

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESCUELA DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

MODELOS PARA UNA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN
EFICIENTE DEL TRANSPORTE URBANO DE MERCANCÍAS

PhD THESIS

MODELS FOR AN EFFICIENT PLANNING AND
MANAGEMENT OF URBAN FREIGHT TRANSPORT

Presentada por: **SARA EZQUERRO EGUIZÁBAL**

Dirigida por: **Prof./Dr.(a) JOSÉ LUIS MOURA BERODIA**

Santander, 2020

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi director de tesis, D. José Luis Moura, quien me dio la oportunidad de realizar esta tesis doctoral bajo su dirección y comenzar mi desarrollo científico y laboral en Grupo de Investigación de la Universidad de Cantabria, sin él este trabajo de investigación no hubiera sido posible.

También quiero agradecer al resto de profesores del Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la Universidad de Cantabria, en especial al D. Borja Alonso, por su apoyo y conocimientos, los cuales han contribuido a resolver dudas de esta tesis.

Me gustaría también reconocer mi agradecimiento al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad por la financiación en los proyectos de investigación: TRA2012-39466-C02-02 y TRA2013-48116-R y TRA2015-69903-R, los cuales han permitido financiar mi carrera investigadora en el Grupo de Investigación. Así como al ayuntamiento de Santander por facilitar datos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Además, quiero agradecer a mis compañeros del Grupo de Investigación de Sistemas de Transporte de la Universidad de Cantabria por su colaboración y ayuda durante la elaboración de la tesis. Con ellos he compartido tanto los momentos difíciles como cada alegría que se han dado durante esta investigación.

Finalmente, no puedo dejar de agradecer a mi familia, amigos y en especial a Miguel, por su apoyo, cariño y comprensión.

Resumen

El transporte de mercancías es un elemento esencial en la actividad socioeconómica de las ciudades, pero también produce un impacto importante en las mismas, ya que contribuyen de manera significativa en la congestión, en la contaminación y en la ocupación del espacio público que escasea en el centro de las ciudades. Por este motivo, existen numerosas investigaciones orientadas a mejorar el impacto que el transporte urbano de mercancías produce. Dichas investigaciones han sido revisadas con el objetivo de conocer los estudios desarrollados en el área del transporte urbano de mercancías para así presentar nuevas aportaciones al estado del conocimiento.

En la presente tesis se presentan modelos que tienen como objetivo proponer mejoras al transporte urbano de mercancías. En primer lugar, se desarrollan modelos para optimizar el espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga. Una metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga se ha llevado a cabo con un doble objetivo: conocer las características de las zonas de carga y descarga y el uso que se hace de las mismas, por un lado. Y, por otro lado, determinar cuantitativamente la influencia del uso ilegal de las zonas de carga y descarga en el uso eficiente del espacio público. Para ello se determina el número de bahías de carga, así como el espacio público (m^2) que está siendo usado incorrectamente.

Otro de los modelos, es el modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga. Se trata de un modelo de dos etapas, en la que en la primera etapa se realiza una primera estimación del número óptimo de bahías de carga y descarga haciendo uso de la teoría de colas, y en la segunda etapa se realiza una simulación de los vehículos de mercancías para así obtener de una manera más realista el número óptimo de zonas de carga y descarga necesarias.

El último de los modelos desarrollados para optimizar el espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga es el modelo de uso compartido de las paradas de autobús urbano. El objetivo de este modelo es analizar y evaluar el uso real de las paradas de autobús para así diseñar un espacio que sea de uso compartido entre autobuses y vehículos de mercancías. Estos espacios se denominan paradas de autobús de uso compartido y tienen un uso preferencial por autobuses urbanos, sin embargo,

los vehículos de mercancías pueden usarlos cuando no estén siendo usadas. Para ello los vehículos de mercancías disponen de la información real de llegada de los autobuses a la parada.

Por último, se ha desarrollado un modelo de optimización de vehículos de mercancías de gran dimensión. Los vehículos de mercancías de gran dimensión no son habituales en las ciudades, sin embargo, en ocasiones es necesario transportar grandes cantidades de mercancía/material a puntos específicos del centro de las ciudades. Por ese motivo este modelo tiene como objetivo minimizar el impacto de este tipo de transportes desde el punto de vista económico, social y medioambiental. Se trata de un modelo de optimización basado en una programación matemática bi-nivel que minimiza los costes totales del sistema. En el nivel inferior se obtienen los datos del modelo de red de la ciudad de aplicación, como son flujo de vehículos, tiempos de viaje etc. Estos datos son utilizados en el nivel superior para calcular los costes del sistema. La aplicación del modelo define el tamaño y tipología de flota de vehículos de gran dimensión, así como las rutas a seguir para crear el menor impacto sobre la ciudad.

Los modelos presentados han sido aplicados en la ciudad de Santander (España). Esto ha permitido simular los modelos en un caso real y demostrar que es posible mejorar el impacto que el transporte de mercancías tiene sobre las ciudades. Desde el impacto que produce en el uso del suelo público urbano, hasta el impacto en la congestión y contaminación de las ciudades.

Se han obtenido conclusiones que pueden ayudar a los tomadores de decisiones de las ciudades a planificar, gestionar y diseñar el transporte de mercancías. De la metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga se obtiene que aproximadamente el 30% de las zonas de carga y descarga está siendo usado incorrectamente actualmente en el centro de la ciudad. Por otro lado, se observa que el número de bahías de carga y descarga no están bien diseñadas, habiendo en algunas zonas déficit y en otras en exceso. Además, se han obtenido conclusiones que pueden ayudar a definir la capacidad de las zonas de carga y descarga, así como sus características. El modelo de uso compartido de las paradas de autobús muestra como estos espacios, que actualmente están infrautilizados, pueden aumentar el tiempo que están siendo usados hasta más de un 70%, si son usados tanto por autobuses como por vehículos de mercancías.

El último de los modelos descritos, el modelo de optimización de mercancías de gran dimensión se ha aplicado en un sistema completo de transporte de materiales de construcción a un punto específico del centro de la ciudad. Debido a las características de la ciudad y al punto de entrega de material, los vehículos solo pueden circular por 3 rutas. En función de los objetivos que se quieran alcanzar (reducir el impacto social, medioambiental y/o económico), el número y tipo de vehículos de gran dimensión que circularán por una ruta u otra varía.

Abstract

Freight transport is essential in socio - economic activity in cities, but it also has a significant impact on them, because they contribute significantly to congestion, environmental pollution and the occupation of public space that is scarce in city centres. For that reason, there are numerous researches aimed to improve the impact that urban freight transport has on cities. In this doctoral thesis, a review of the international bibliography has been developed with the aim of learning the researches developed in urban freight transport area in order to present new contributions to the state of knowledge.

Models has been developed with de aim of propose improves to urban freight transport. Firstly, it has been developed models to optimize the space used by carriers to make loading and unloading activities. An analysis methodology of the use of loading and unloading zones has been carried out with a double objective. On the one hand, know the characteristics of loading and unloading zones and the use that is made of them. On the other hand, quantitatively determine the influence of illegal use of loading and unloading zones on the efficient use of public space. To this end, the number of delivery bays and the public space (m^2) used incorrectly is obtained.

Another model developed is the optimization of the number of delivery bays model. It is a two-stage model, in the first step a first an initial estimation is made using queue theory, and in the second stage a freight vehicle simulation is made to more realistically obtain the optimal number of delivery bays.

The last model developed to optimize the space used to make loading and unloading activities is the shared bus stop use model. The objective of this model is analyse and evaluate the real use of bus stops in order to design an space that is shared between buses and freight vehicles. These spaces are called shared bus stops. Buses are still given preference, but freight transport vehicles will be allowed to use these areas when they are not being used by the public transport vehicles by providing real time bus arrivals information.

Finally, an optimization model for large freight vehicles has been developed. Large freight vehicles are not usual in cities; however, it is sometimes necessary transport large quantities of goods or material to a specific point in the city centre. The objective of this model is to minimize the cost of this freight transport type from an economic, social and environmental viewpoint. It is model based on bilevel mathematical programming which minimizes the total system costs. City network model data are obtained on the lower level such as vehicle flow and travelling times, which are then used on the upper level to calculate total system costs. The application of the model defines the size and type of large freight vehicles, as well as the routes to create the least impact on the city.

The presented models have been applied in a real case in Santander (Spain). This has allowed to simulate the models in a real case and show that is possible to improve the freight transport impact on cities. From the impact that freight vehicles have in the use of urban public spaces, to the congestion and pollution impact in cities.

The conclusions obtained can help city decision makers to plan, manage and design freight transport. From the analysis methodology of the use of loading and unloading zones it can be seen that approximately 30% of the loading and unloading zones are being used incorrectly in the centre of Santander. Furthermore, the number of delivery bays are not well designed, some zones in deficit of delivery bays and others in excess. In addition, it has been drawn conclusions that can help to define the capacity and characteristics of the loading and unloading zones. The shared bus stop use model shows how these spaces, that are currently unused, can increase the used time by more than 70%, if they are used by both buses and freight vehicles.

The last model described, the optimization model for large freight vehicles has been developed in a complete system of transportation of construction materials to a specific point in the city centre. Due to the characteristics of the city and the material delivery point, large freight vehicles can only circulate on 3 routes. Depending on the objectives to be achieved (reduce the social, environmental and / or economic impact), the number and type of large vehicles that will circulate on one route or another varies.

Contenido

Agradecimientos	i
Resumen.....	iii
Abstract	vi
Contenido	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tablas.....	xiii
Capítulo 1 Introducción y objetivos.....	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Aportaciones	4
1.4. Estructura de la tesis	5
Capítulo 2 Estudio del estado del arte.....	7
2.1. Introducción	7
2.2. Transporte urbano de mercancías y sus impactos.....	8
2.2.1. Clasificación de vehículos de mercancías.....	8
2.2.2. Impacto ambiental de los vehículos de mercancías.....	12
2.2.3. Agentes implicados en el transporte urbano de mercancías.....	14
2.3. Estrategias o políticas dirigidas a la mejora del transporte urbano de mercancías ...	16
2.3.1. Medidas para regular el acceso de los vehículos de mercancías	21
2.3.2. Medidas dirigidas a mejorar la cadena de suministro en ámbito urbano	24
2.3.3. Medidas para regular el aparcamiento de los vehículos de mercancías	27
Capítulo 3 Modelos propuestos para mejorar el transporte urbano de mercancías.....	33
3.1. Introducción	33
3.2. Modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga	36
3.2.1. Metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga.....	37
3.2.2. Modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga.....	43
3.2.3. Modelo de uso compartido de paradas de autobús urbano	50
3.3. Modelo de optimización de vehículos de mercancía de gran dimensión.....	55
Capítulo 4 Descripción del caso de estudio	61
4.1. Introducción	61
4.2. Características de la ciudad de Santander	62
4.3. Recolección de información	64

4.4.	Información recolectada	71
4.4.1.	Demanda de transporte	71
4.4.2.	Caracterización de las zonas de carga y descarga.....	76
4.4.3.	Caracterización de los vehículos que usan las zonas de carga y descarga.....	79
4.4.4.	Líneas y paradas de autobús.	84
Capítulo 5	Resultados del caso de estudio	87
5.1.	Aplicación de los modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga	87
5.1.1.	Aplicación de la metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga	87
5.1.2.	Aplicación del modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga	100
5.1.3.	Aplicación del modelo de uso compartido de paradas de autobús urbano	110
5.2.	Aplicación del modelo de optimización de vehículos de mercancía de gran dimensión	120
Capítulo 6	Conclusiones y líneas de investigación futuras	127
6.1.	Conclusiones.....	128
6.1.1.	Conclusiones de los modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga	128
6.1.2.	Conclusiones del modelo de optimización de vehículos de mercancías de gran dimensión	133
6.2.	Líneas de investigación futuras	134
Chapter 6	Conclusions and future developments	135
6.1.	Conclusions	136
6.1.1.	Conclusions of the models that optimize the space used by carriers to perform loading and unloading activities.....	136
6.1.2.	Conclusions of the optimization model for large freight vehicles in congested urban areas	140
6.2.	Future developments	141
Referencias	143

Lista de figuras

Figura 1. Fuentes principales de los niveles de ruido urbano (Monreal, 2013).....	9
Figura 2. Tendencia de emisiones de contaminantes al aire por el transporte (EEA, 2019)	13
Figura 3. Esquema de la distribución urbana de mercancías con compras online (CITET, 2017)15	
Figura 4. Modelos desarrollados para mejorar el transporte urbano de mercancías	35
Figura 5. Esquema de la metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga.....	38
Figura 6. Ejemplo de zona de C/D y calle donde está ubicada.....	40
Figura 7. Esquema de los diferentes escenarios analizados en el modelo de análisis de uso de las zonas de C/D	42
Figura 8. Metodología de optimización de bahías de carga/descarga	45
Figura 9. Diagrama de simulación de eventos discretos.....	49
Figura 10. Diagrama de uso de las paradas de autobús de uso compartido	52
Figura 11. Metodología bi-nivel de optimización de vehículos pesados.	57
Figura12. Ubicación de la ciudad de Santander	62
Figura 13. Santander y sus distritos y secciones censales.	63
Figura 14. Las 29 secciones censales del centro de Santander	63
Figura 15. Red de infraestructuras del modelo macroscópico de transporte de Santander	64
Figura 16. Encuesta realizada a los transportistas en las zonas de C/D.....	68
Figura 17. Zonas de carga y descarga en las que se han realizado encuestas.	70
Figura 18. Zonas de carga/descarga grabadas durante 7 días.	71
Figura 19. Kg entregados/ día en cada sección censal del centro de Santander	74
Figura 20. Ubicación de las zonas de carga y descarga.....	76
Figura 21. Tipología de vehículos que usan las zonas de C/D	79
Figura 22. Distribución de llegadas a las zonas de C/D	80
Figura 23. Distribución de la demanda en las 4 zonas de C/D grabadas	81
Figura 24. Distribución de probabilidad del tiempo de aparcamiento por tipología de vehículo	82
Figura 25. Comportamiento de los transportistas en las zonas de C/D en cuanto al aparcamiento	82
Figura 26. Distancia entre la zona de C/D y el comercio.....	83
Figura 27. Paradas de autobús con baja frecuencia de paso.	85
Figura 28. Parada de autobús vacía vs ocupada ilegalmente por vehículos de mercancía.	85

Figura 29. Ocupación en las zonas de C/D, en doble fila, en las aceras y en zona restringida en las zonas de C/D analizadas.....	89
Figura 30. Ocupación en las zonas de C/D grabadas. Datos recolectados vs datos simulados ..	93
Figura 31. Ocupación media de las 4 zonas de C/D en las 7 situaciones planteadas.	95
Figura 32. Diferencia entre DB_c y DB_{QT}	101
Figura 33. Esquema de la modelación llevada a cabo en Rockwell Arena para el desarrollo del modelo de optimización de numero de bahías de C/D.....	104
Figura 34. Nº de vehículos en cola en la sección censal 101.	105
Figura 35. Tiempo de vehículos en cola en la sección censal 101.	106
Figura 36. Diferencia entre el número óptimo de DB cuando el tiempo de C/D es el actual y el número de DB actual.....	108
Figura 37. Diferencia entre el número óptimo de DB cuando el tiempo de C/D es el permitido (menor a 30 minutos) y el número de DB actual	108
Figura 38. Nº de entregas vs nº óptimo de DB	109
Figura 39. Localización de paradas de autobús candidatas a ser mixtas, zonas de C/D y sección censal en el que están ubicadas.....	111
Figura 40. Esquema de la modelación llevada a cabo en Rockwell Arena para el modelo de uso compartido de paradas de autobús urbano	112
Figura 41. Ocupación media de la parada de autobús de uso compartida 268 por FV	115
Figura 42. Ocupación media de la BS 268 en la situación actual vs parada de autobús de uso compartido en un día laborable.....	116
Figura 43. Ocupación media de la BS 268 (zona 605) por vehículos de mercancías para líneas de autobús con diferentes frecuencias.	119
Figura 44. Nº de vehículos de mercancías usando paradas de autobús desde las 7.00 a las 14.00h vs variaciones en la frecuencia de paso de autobús	120
Figura 45. Posibles rutas a elegir en Santander en el modelo de optimización de vehículos de gran dimensión.....	121
Figura 46. Costes totales medios para el caso de estudio	122
Figura 47. Posibles opciones para transportar la carga	124

Lista de tablas

Tabla 1. Principales estudios dirigidos a la mejora del transporte urbano de mercancías.....	18
Tabla 2. Proyectos con mayor impacto que aplicaron medidas para mejorar el transporte urbano de mercancías.	20
Tabla 3. Índice de consumo de los vehículos (litros/km) e índice de emisiones de los vehículos (g de contaminante/kg de combustible).....	60
Tabla 4. Costes ambientales de cada tipo de contaminante (€/ton.)	60
Tabla 5. Proyectos en los que se ha desarrollado el modelo de transporte de Santander.	66
Tabla 6. Tamaño muestral mínimo por tipología de mercancía	70
Tabla 7. Valores de los parámetros β_{ad} y β_{asa}	73
Tabla 8. Cantidad entregada clasificada por tipología de mercancía	73
Tabla 9. Número de zonas y bahías de carga y descarga en el centro de Santander.	77
Tabla 10. Características de las zonas de C/D grabadas	78
Tabla 11. Clasificación de las zonas de C/D según sus características	78
Tabla 12. Tipología de vehículos de mercancías.	79
Tabla 13. Distribución del tiempo de aparcamiento por tipología de vehículo.....	81
Tabla 14. Uso ilegal de las zonas de C/D y sus alrededores.	84
Tabla 15. Hora teórica de paso y frecuencia de paso de la parada de autobús 268.	86
Tabla 16. Longitud de las paradas de autobús analizadas.	86
Tabla 17. Distribución del tiempo de entrega de mercancías para los escenarios planteados en la metodología de análisis del uso de las zonas de C/D.....	91
Tabla 18. Porcentaje de ilegalidades simuladas en las zonas de C/D grabadas.....	92
Tabla 19. Nº de C/D y m ² de espacio público mal usados en las 7 situaciones y para las 4 zonas de C/D analizadas	97
Tabla 20. M ² mal usados en todo el centro de Santander durante la hora punta.....	99
Tabla 21. Resultados obtenidos en la sección censal 101.....	105
Tabla 22. Resultados obtenidos aplicando el modelo de optimización del número de bahías de C/D.....	107
Tabla 23. Comparativa entre datos teóricos y datos reales en días laborables en la zona 605	113
tabla 24. Características y resultados obtenidos en las 7 paradas de autobús de uso compartido.	114
Tabla 25. Resultados de ocupación obtenidos tras aplicar el modelo de uso compartido de paradas de autobús.....	117

Tabla 26. Resultados obtenidos de la aplicación del modelo de optimización de bahías de C/D en las secciones censales en los que se ha aplicado el modelo de uso compartido de paradas de autobús.....	118
Tabla 27. Tipología de vehículos de mercancía de gran dimensión.....	121

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Motivación

El transporte urbano de mercancías tiene una importancia relevante en las ciudades actuales. A las ciudades llega una gran cantidad de bienes y productos, de diferentes tipologías, dimensiones, pesos..., los cuales se entregan en comercios, hogares, o bien a intermediarios de la cadena de suministro, a través de los vehículos de mercancías. Este tipo de vehículos generan un gran impacto ya que contribuyen de forma significativa a incrementar el nivel de congestión, a aumentar la contaminación y a una mayor ocupación del espacio público de las ciudades, haciendo un uso más ineficiente del mismo.

Como resultado del crecimiento de la actividad económica, y la consecuente mejora del bienestar en la sociedad, los desplazamientos que se realizan en las ciudades han aumentado considerablemente, tanto en transporte público como en transporte privado. Este fenómeno no es exclusivo de la necesaria movilidad de las personas (transporte privado y público), ya que el transporte de mercancías es un fenómeno paralelo de movilidad que se desarrolla en la ciudad. Asimismo, un escenario posible de futuro puede ser aquel que requiera una menor movilidad de personas, y en cambio se disparen los movimientos de mercancías, bienes y productos.

A todo esto, hay que añadir que las horas punta de tráfico de movilidad de personas y de transporte de mercancías tienden a coincidir. Esto es debido a que los comerciantes, principales receptores de las mercancías, desean recibir las mercancías cuando ellos se encuentran en sus comercios y preferiblemente en horario de mañana para así disponer

de suministros para toda la jornada laboral. Como consecuencia de ello, se produce una concentración de vehículos durante una franja horaria relativamente pequeña que genera graves problemas en la ciudad.

Además, otro aspecto que merece la pena mencionar es el espacio público existente y disponible en los centros de las ciudades. Este tipo de espacio público escasea y por tanto es necesario una planificación y gestión más eficiente del mismo, abordando los actuales problemas de competencia por el espacio entre vehículos públicos y privados de pasajeros, los vehículos de mercancías y los peatones. Los usuarios de cada una de estas formas de movilidad solicita aumentar o mejorar el espacio del que hace uso. Los usuarios de vehículos de transporte públicos, como autobuses, solicitan, entre otros, más o mejores paradas de autobús; los usuarios de transporte privado, un aumento de plazas de aparcamiento; los usuarios de transporte de mercancías, los transportistas, un mayor número de zonas de carga y descarga; y finalmente los peatones, un aumento de zonas peatonales.

Existen numerosos estudios y políticas para paliar el impacto del transporte de mercancías en las ciudades, los cuales han tenido un éxito considerable. Sin embargo, los problemas existentes en las ciudades debido al acceso y circulación de vehículos de mercancías no se han eliminado, y todavía se pueden optimizar las operaciones de los mismos y así disminuir sus impactos negativos. Es por ello, que es necesario estudiar nuevas soluciones y/o políticas, o mejorar las existentes, para minimizar los problemas actuales debidos a este tipo de transporte en área urbana.

Por tanto, en esta tesis se presentan modelos y metodologías para hacer frente a algunos de los diferentes problemas que existen actualmente en los entornos urbanos como consecuencia del transporte de mercancías. Es un tipo de transporte necesario, que crecerá en los próximos años de forma considerable y que por tanto está necesitado de herramientas que ayuden a su optimización.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis doctoral es proponer mejoras a la planificación y gestión del transporte urbano de mercancías en entornos urbanos para así paliar los problemas existentes actualmente en este ámbito. Para lograr este objetivo principal, es necesario llevar a cabo una serie de objetivos específicos:

- Analizar la problemática existente en las ciudades en torno a transporte de mercancías en todas sus facetas, para así entender el funcionamiento del mismo y plantear soluciones a los problemas existentes.
- Identificar las políticas dirigidas a mejorar el transporte urbano de mercancías mediante una revisión bibliográfica, para así conocer los aspectos donde incidir en la investigación.
- Realizar un análisis y revisión del estado del arte mucho más exhaustiva de dichos aspectos a partir de los resultados de los objetivos anteriores.
- Analizar el uso de las zonas de carga y descarga, así como sus características y las de los vehículos que hacen uso de las mismas, para comprender y modelar el comportamiento de los usuarios en torno a las mismas.
- Proponer herramientas para optimizar los espacios que los vehículos de mercancías utilizan para realizar sus operaciones de carga y descarga.
- Proponer herramientas para optimizar el transporte de vehículos de gran dimensión de mercancías que necesariamente tienen que circular por la ciudad, reduciendo sus impactos desde un punto de vista económico, social y medioambiental.
- Aplicar las diferentes metodologías y herramientas desarrolladas anteriormente en un caso real, como es la ciudad de Santander, para validar su funcionamiento y precisión y aportar las pertinentes conclusiones.

1.3. Aportaciones

Las principales aportaciones que esta tesis proporciona al estado del conocimiento son el desarrollo de modelos y metodologías que ayudan a la toma de decisiones en planificación y gestión del transporte de mercancías en ámbito urbano, logrando sistemas más eficientes y reduciendo los impactos negativos de este tipo de transporte. En particular:

- Se propone una metodología para analizar las características y el uso de las zonas de carga y descarga. En base al uso de las mismas, se determina cómo influyen las ilegalidades que en ellas se producen en el uso eficiente del espacio público. Esta influencia se determina para la situación actual y para otras posibles situaciones.
- Se ha desarrollado un modelo para diseñar el número óptimo de bahías de carga y descarga en una determinada área urbana, que permite corregir los actuales desequilibrios producidos por una falta de planificación o si existe por quedarse obsoleta.
- Se presenta un modelo de uso compartido de las paradas de autobús urbano, para operaciones de carga y descarga, con el objetivo de maximizar el uso del espacio público. De esta manera se aumenta el uso de este espacio y permite mejorar la distribución de otros espacios habilitados para realizar actividades de carga y descarga.
- Se propone un modelo para minimizar el impacto de los vehículos de mercancías de gran dimensión que necesariamente circulan por la ciudad, definiendo rutas, número y tipo de vehículo, desde el punto de vista económico, social y ambiental.
- Se han aplicado las metodologías y modelos anteriores a un caso real, la ciudad de Santander, logrando validarlos y evaluarlos, obteniendo propuestas reales y factibles de planificación y gestión que minimizan el impacto del transporte urbano de mercancías.

A partir de la investigación desarrollada en esta tesis se han producido las siguientes publicaciones en revistas de alto impacto:

- Ezquerro, S., Romero, J. P., Moura, J. L., Benavente, J., & Ibeas, Á. (2018). Minimizing the impact of large freight vehicles in the city: a multicriteria vision for route planning and type of vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, 2018.
- Ezquerro, S., Alonso, B. & Moura, J.L. (2020). Sharing bus stops: an efficient use of public spaces. *Journal of Cleaner Production* (Under review).
- Ezquerro, S., Moura, J.L. & Alonso, B. (2020). Illegal use of loading bays and its impact on the use of public space. *Sustainability* (Under review).

1.4. Estructura de la tesis

Esta tesis doctoral se ha dividido en 6 capítulos, con el objetivo de presentar de forma ordenada y clara el contenido de esta tesis.

El presente capítulo, el capítulo I, presenta la introducción de la tesis exponiendo la motivación que ha dado lugar a la misma, así como los objetivos a satisfacer y las aportaciones que este trabajo de investigación proporciona al estado del conocimiento. Finalmente se plantea la estructura general en la que se organiza la tesis, explicando el contenido de cada uno de los capítulos.

El capítulo 2 presenta el estado del arte, realizando una revisión exhaustiva de los principales elementos que son clave para el desarrollo de la tesis, como son: el transporte de mercancías en áreas urbanas y cuáles son los principales problemas existentes; y en segundo lugar, las políticas dirigidas a la mejora del mismo, centrándose principalmente en las medidas destinadas a la mejora del ruteo de vehículos de mercancías y políticas que tienen como objetivo mejorar la planificación y/o gestión de

las zonas de parada de los vehículos de mercancías, es decir, las zonas de carga y descarga.

El capítulo 3 expone las propuestas de mejora para el transporte urbano de mercancías que se desarrollan y proponen en la presente tesis doctoral. Para cada una de ellas se expone el modelo o metodología desarrollada para lograr dicha mejora. En primer lugar, se presentan los modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga: una metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga, un modelo que optimiza el número de zonas de carga y descarga, y un modelo de uso compartido de las paradas de autobús urbano. Finalmente, la última propuesta se basa en un modelo de planificación y gestión de vehículos de mercancías de gran dimensión en ámbito urbano.

En el capítulo 4 se describe la ciudad considerada para el caso de estudio, la ciudad de Santander. Además, también se presenta el sistema de recogida de información necesaria para poder llevar a cabo la aplicación de las diferentes metodologías y modelos planteados, así como los resultados obtenidos de la recogida de información relativos a las características de los vehículos de mercancías y el uso de las zonas de carga y descarga.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos y metodologías en el caso de estudio, es decir, los resultados de las cuatro propuestas de mejora planteadas en esta tesis, para así valorar las mejoras aportadas.

Finalmente, en el capítulo 6, se muestran las conclusiones y las aportaciones de la tesis al estado del conocimiento. Además, en este capítulo también se exponen las futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

Estudio del estado del arte

2.1. Introducción

Este capítulo sirve de estructura de partida para la elaboración de la investigación presentada en esta tesis doctoral. La revisión y análisis sobre estudios de investigación llevados a cabo en el ámbito del transporte urbano de mercancías es la base para conocer la problemática existente y proponer nuevas o diferentes estrategias o políticas de mejora. Se ha llevado a cabo un profundo análisis de la bibliografía nacional e internacional tanto de investigaciones teóricas como de proyectos aplicativos, analizando cuales eran los objetivos y los resultados obtenidos, así como las conclusiones y aportaciones al estado del arte. Este análisis permite ser conocedor de la evolución del transporte urbano de mercancías, de los problemas que ya han sido resueltos, total o parcialmente, y aquellos que han ido surgiendo. Además, proporciona información sobre las diferentes medidas, modelos y metodologías desarrolladas para combatir dichos problemas.

El transporte de mercancías en ámbito urbano se estima que supone entre el 6 y el 18% del flujo del tráfico urbano (Russo & Comi, 2012), y tiene un gran impacto sobre la ciudad produciendo, entre otros: aumento de la congestión, aumento de la contaminación, aumento de los costes, ocupación de espacio público etc. Es por ello que la planificación, la regulación y la gestión del transporte de mercancías en áreas urbanas es transcendental para minimizar los aspectos negativos y reducir las externalidades derivadas del mismo. Es importante analizar y caracterizar el marco general del

transporte urbano de mercancías, para ello es necesario identificar y caracterizar a los agentes implicados en el mismo, así como el impacto de los vehículos utilizados para este tipo de transporte desde diferentes puntos de vista (medioambiental, social etc.).

Existen varias áreas y subdisciplinas de estudio dentro del ámbito del transporte de mercancías en áreas urbanas. Por este motivo, se ha revisado y analizado las principales políticas dirigidas a mejorarlo.

2.2. Transporte urbano de mercancías y sus impactos

En la presente tesis doctoral, el objetivo principal es proponer mejoras al transporte urbano de mercancías. El objetivo es optimizar globalmente el sistema de transporte de mercancías dentro de un área urbana considerando los costes y beneficios tanto del sector público como del privado. Los transportistas privados y las empresas de mercancías tienen como objetivo reducir sus costes de transporte mientras que el sector público trata de mitigar la congestión de tráfico, los problemas de contaminación y los problemas de uso del espacio público (Bandeira et al., 2018; Hai et al., 2020; Taniguchi et al., 2001). El transporte urbano de mercancías es la parte final de la última milla logística, la cual ha sido definida por Gevaers et al.(2011) como la última etapa en el servicio de entregas de los productores a los consumidores, en el cual el envío es entregado al receptor, ya sea en un establecimiento, en un domicilio o en un punto de recogida.

2.2.1. Clasificación de vehículos de mercancías

El transporte urbano de mercancías se lleva a cabo mediante vehículos de mercancías con diferentes características: capacidad (dimensiones y peso), contaminación acústica

o emisiones de contaminantes. Es importante analizar que tipología de vehículos de mercancías son los que circulan por cada ciudad, ya que los impactos que producen sobre la ciudad tampoco son los mismos. Por este motivo, en función de la tipología de vehículos que circulan por la ciudad la mejora que produce cada política varía. En otras palabras, para conocer la influencia de las diferentes políticas asociadas al transporte urbano de mercancías es necesario conocer el tipo de vehículos que por ella circulan. Por ejemplo, la dimensión y peso permitido de los vehículos de transporte de mercancías influye en cómo será el reparto de la distribución urbana de la mercancía, puesto que dichas dimensiones repercuten en la cantidad de mercancía que se puede llevar en cada viaje o en el número total de viajes. A su vez, estas dimensiones influyen en la capacidad de maniobra y estacionamiento en las zonas de carga y descarga. Por otro lado, la contaminación acústica que producen los vehículos de mercancías influye en la calidad de las ciudades (Figura 1), y es un aspecto que varía con las diferentes tipologías de vehículos.

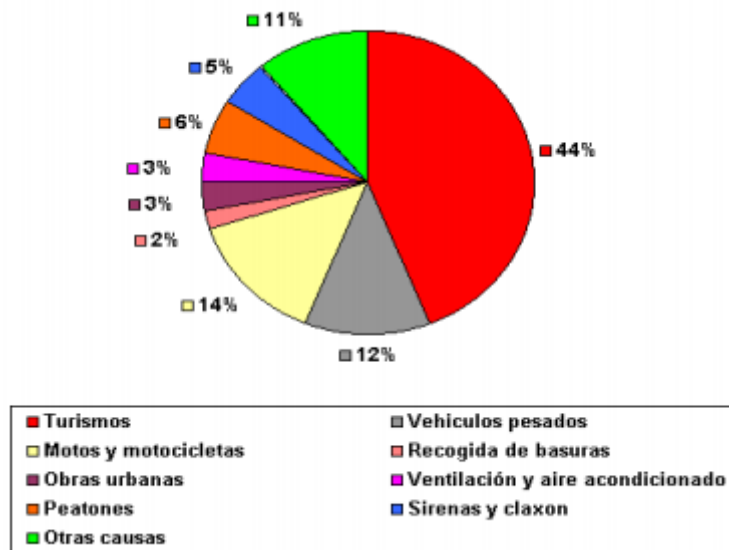


Figura 1. Fuentes principales de los niveles de ruido urbano (Monreal, 2013)

La capacidad contaminante de los diferentes vehículos también es una característica a tener en cuenta. Aunque se ha producido una reducción drástica de las emisiones de contaminantes de los vehículos pesados (las emisiones de un vehículo hace 20 años equivalen a las emisiones de entre 20 y 35 vehículos pesados actuales), estas emisiones siguen teniendo una influencia importante en la calidad del aire (CEOE, 2017).

Actualmente, las investigaciones están encaminadas al uso de vehículos de menor capacidad y menores emisiones de contaminantes en áreas urbanas (Comi et al., 2008; Crainic et al., 2004).

En cuanto a la capacidad de los vehículos de mercancía que circulan por la ciudad, se han establecido unas categorías internacionales de vehículo según la directiva 70/156 CEE sobre homologación de tipo de vehículo (Dir. 70/156/CEE del Consejo, de 6 de febrero de 1970) que establece, entre otros, lo siguiente:

Categoría N: Vehículos de motor destinados al transporte de mercancías que tengan por lo menos cuatro ruedas. Dentro de esta clasificación están:

- Categoría N1: Vehículos destinados al transporte de mercancías con una masa máxima no superior a 3,5 toneladas. Dentro de esta categoría se encuentran:
 - Camión $MMA \leq 3.500$ kg. El que posee una cabina con capacidad hasta 9 plazas, no integrada en resto de la carrocería, y cuya masa máxima autorizada no exceda de 3.500 kg.
 - Tracto-camión. Automóvil para realizar principalmente el arrastre de un semirremolque.
 - Furgón/furgoneta $MMA \leq 3.500$ kg. Automóvil destinado al transporte de mercancías cuya cabina está integrada en el resto de la carrocería con masa máxima autorizada igual o inferior a 3.500 kg.
- Categoría N2: Vehículos destinados al transporte de mercancías y con una masa máxima superior a 3,5 toneladas pero inferior o igual a 12 toneladas.
 - Camión $3.500 \text{ kg.} < MMA \leq 12.000 \text{ kg.}$ El que posee una cabina con capacidad hasta 9 plazas, no integrada en resto de la carrocería, y cuya masa máxima autorizada es superior a 3.500 kg. e igual o inferior a 12.000 kg.
 - Tracto-camión. Automóvil para realizar principalmente el arrastre de un semirremolque
 - Furgón $3.500 \text{ kg.} < MMA \leq 12.000 \text{ kg.}$ Camión en el que la cabina está integrada en el resto de la carrocería, con masa máxima autorizada superior a 3.500 kg. e igual o inferior a 12.000 kg.

- Categoría N3: Vehículos destinados al transporte de mercancías y con una masa máxima superior a 12 toneladas.
 - Camión MMA > 12.000 kg. El que posee una cabina con capacidad hasta 9 plazas, no integrada en resto de la carrocería, y cuya masa máxima autorizada sea superior a 12.000 kg.
 - Tracto-camión. Automóvil para realizar principalmente el arrastre de un semirremolque
 - Furgón MMA > 12.000 kg. Camión en el que la cabina está integrada en el resto de la carrocerías y cuya masa máxima autorizada sea superior a 12.000 kg.

Entendiendo por masa máxima, la masa máxima en carga técnicamente admisible. A estos vehículos, se deben incluir aquellos vehículos asimilables a los de categoría M1 (Vehículos destinados al transporte de personas que tengan, además del asiento del conductor, ocho plazas como máximo.), como son:

- Derivados de turismo: Vehículo automóvil destinado a servicios o a transporte exclusivo de mercancías, derivado de un turismo del cual conserva la carrocería y dispone únicamente de una fila de asientos.
- Vehículo mixto adaptable: Automóvil especialmente dispuesto para el transporte, simultáneo o no, de mercancías y personas hasta un máximo de 9 incluido el conductor, y en el que se puede sustituir eventualmente la carga, parcial o totalmente, por personas mediante la adición de asientos.

Por otro lado, se establece una clasificación de vehículos según su potencial contaminante (Orden PCI/810/2018), que en lo relativo a vehículos de mercancías indica:

- Vehículos 0 emisiones: Vehículos, M1, N1, N2 y N3 clasificados en el Registro de Vehículos como vehículos eléctricos de batería (BEV), vehículo eléctrico de autonomía extendida (REEV), vehículo de hidrógeno (HICEV), vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV) con una autonomía mínima de 40 kilómetros (ciclo NEDC) o vehículos de pila de combustible.

- Vehículos ECO: Vehículos M1 y N1, clasificados en el Registro de Vehículos como vehículos híbridos enchufables con autonomía <40km (ciclo NEDC), vehículos híbridos no enchufables (HEV), vehículos propulsados por gas natural, vehículos propulsados por gas natural comprimido (GNC), o gas licuado del petróleo (GLP). Vehículos N2 y N3 clasificados en el Registro de Vehículos como híbridos enchufables con autonomía <40km, híbridos no enchufables (HEV), propulsados por gas natural comprimido (GNC), gas natural licuado (GNL) o gas licuado del petróleo (GLP). En todo caso, deberán cumplir los criterios de la clasificación C.
- Vehículos C: Vehículos M1 y N1 clasificados en el Registro de Vehículos como gasolina Euro 4/IV, 5/V o 6/VI o diésel Euro 6/VI. Vehículos N2 y N3 clasificados en el Registro de Vehículos como gasolina Euro VI/6 o diésel Euro VI/6.
- Vehículos B: Vehículos M1 y N1 clasificados en el Registro de Vehículos como gasolina Euro 3/III o diésel Euro 4/IV o 5/V. Vehículos N2 y N3 clasificados en el Registro de Vehículos como gasolina Euro IV/4 o V/5 o diésel Euro IV/4 o V/5.
- Vehículos A: Todo vehículo a motor que por su clasificación en el Registro de Vehículos no cumple las condiciones o requisitos para la obtención de la clasificación 0 emisiones, ECO, C o B.

2.2.2. Impacto ambiental de los vehículos de mercancías

Los vehículos de mercancías tienen un gran impacto en la contaminación ambiental de la ciudad, suponiendo entre el 16 y el 50% de la emisión de contaminantes realizadas por vehículos (Dablanc, 2007). Además de la capacidad contaminante de los vehículos de mercancías, estos también contribuyen en la congestión de tráfico que se produce en las ciudades, ya que interactúa con el resto de los medios de transporte por carretera, tanto en los desplazamientos entre puntos de entrega como en las maniobras de estacionamiento en las zonas de carga y descarga. Estas interacciones contribuyen de manera significativa a la congestión que se produce en las ciudades, y como consecuencia a la contaminación. Sin embargo, hay que tener en cuenta el movimiento de todos los vehículos, tanto de mercancías como de viajeros, en el análisis de la contaminación debida al transporte en las ciudades. El transporte contribuye

significativamente a las emisiones de los principales contaminantes (NO_x, NMVOC, PM_{2.5}, SO_x y CO), por este motivo hay que considerarlos en el estudio del impacto medioambiental del transporte. Cabe destacar, que las emisiones de contaminantes de todos los sectores del transporte están disminuyendo notablemente desde 1990 a pesar del aumento general de movimiento de vehículos (Figura 2).

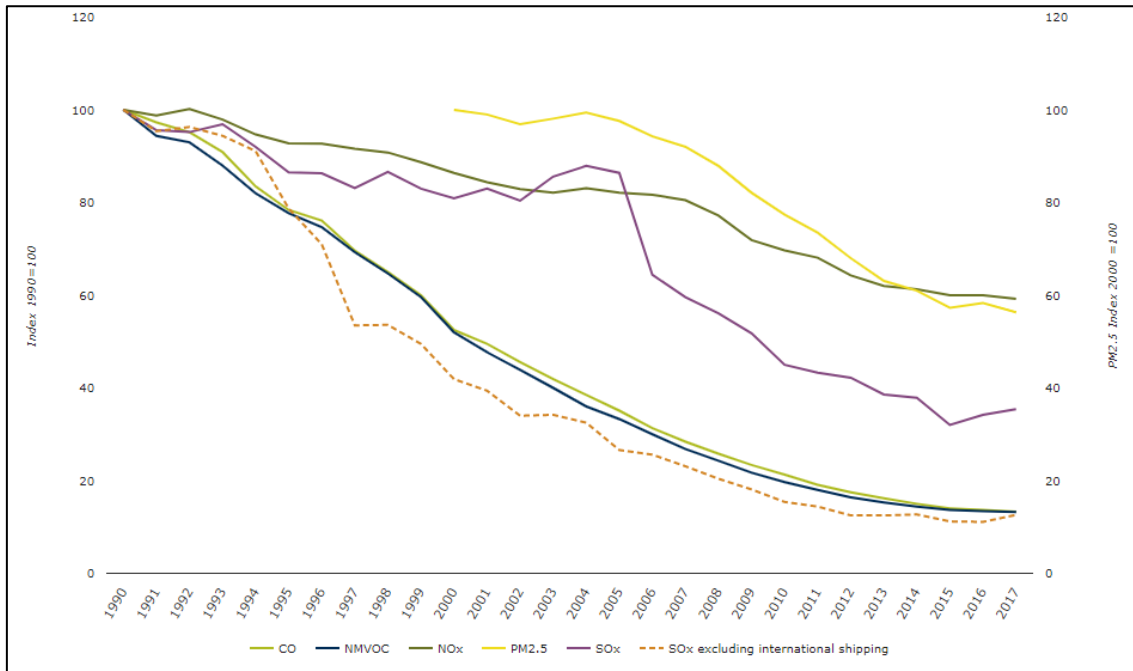


Figura 2. Tendencia de emisiones de contaminantes al aire por el transporte (EEA, 2019)

Estos datos, que explican la calidad del aire y las emisiones contaminantes, se pueden obtener aplicando diferentes metodologías, por ejemplo mediante el monitoreo de la calidad del aire (Kumar et al., 2015). Pero es necesario asegurar la calidad de estos datos, es por ello que Adams et al. (2009) analizan la base de la información existente sobre emisión de contaminantes en diferentes países, y describe iniciativas para mejorar la calidad de estos datos.

Por otro lado, conocer los modelos de emisiones de vehículos es importante para reducir las emisiones de contaminantes en la planificación de rutas de transporte (Demir et al., 2014; Dente & Tavasszy, 2018). Un ejemplo de ello es el estudio realizado por Wang et al. (2006), en el cual investigan las características de dispersión de gases y partículas emitidas por el tráfico en Hong Kong, considerando CO y PM 2.5. Muchos estudios sobre minimización de emisiones en el ruteo de vehículos asumen que los vehículos deben

desplazarse a la velocidad a la que se minimicen las emisiones (Bektaş & Laporte, 2011). Sin embargo, hay que tener en cuenta que en áreas urbanas los vehículos viajan a la velocidad del tráfico (Ehmke et al., 2016). Como se ha mencionado anteriormente la tipología de vehículos de mercancía actuales es menos contaminante. Wygonik & Goodchild (2018) evaluaron como el diseño del servicio de entregas y la estructura urbana en la que operan los transportistas afectan a su rendimiento y a las emisiones de contaminantes. A esto hay que añadir las diferentes estrategias y políticas de gestión el transporte urbano de mercancías que han incidido directamente en una mayor eficiencia de este transporte y han contribuido en la reducción de las emisiones de contaminantes a la atmosfera. Dichas estrategias y políticas se describen más adelante en el capítulo 2.3.

2.2.3. Agentes implicados en el transporte urbano de mercancías

En el transporte de mercancías en las ciudades hay que considerar todos los actores implicados, ya que son los que tienen que hacer frente a las nuevas políticas y/o estrategias. Los agentes implicados son:

- Los distribuidores, que se ocupan de preparar y organizar el envío de mercancías.
- Los consolidadores de carga (freight forwarders), que son los intermediarios entre distribuidores y receptores.
- Los receptores (consumidores o consignatarios), que puede ser tanto el usuario final como un intermediario de la cadena logística.
- Los transportistas, que son las empresas que se encargan del transporte físico de la mercancía.

Un cambio importante que se ha producido en las últimas décadas en las preferencias de los consumidores es el crecimiento notable de las compras online y del reparto just-in-time. Las razones y las consecuencias derivadas de este crecimiento han sido estudiadas por multiples investigadores (Allen et al., 2018). Los consumidores cada vez

hacen más uso del comercio electrónico, solicitando productos online para ser entregados en los hogares o en puntos de recogida (Morganti et al., 2014). Esto produce un cambio importante en la distribución urbana de mercancías debido a la fragmentación de los envíos y un aumento de las entregas de tamaño reducido (Dablanc, 2019; Janjevic & Winkenbach, 2020; Visser et al., 2014) (Figura 3).



Figura 3. Esquema de la distribución urbana de mercancías con compras online (CITET, 2017)

La opinión de todos los agentes implicados es necesaria para definir nuevas políticas, ya que sin su aprobación sería imposible adoptar nuevas políticas urbanas de mercancías con éxito. Es por ello que es necesario estudiar cuál sería su actitud frente a nuevas políticas (Domínguez et al., 2012). Algunos estudios realizan análisis empíricos considerando el punto de vista de los agentes involucrados para así mejorar el diseño de la política objeto de estudio (Stathopoulos et al., 2012). Es particularmente importante centrarse en los receptores de mercancías, ya que cuando se introduce una nueva política, ellos son los principales agentes de decisión y tienden a jugar un papel dominante (Holguín-Veras et al., 2008). Dell'Olio et al. (2017) analizaron el comportamiento de los receptores en dos ciudades españolas frente a dos nuevas políticas de distribución: distribuciones nocturnas y el uso de centros urbanos de distribución, obteniendo que en ninguno de los casos, los receptores prefieren no cambiar la manera en la que reciben la mercancía. Otros estudios, se centran en los factores que influyen en la aceptabilidad de las medidas, como es el estudio de Punel & Stathopoulos (2017) sobre el crowdshipping.

2.3. Estrategias o políticas dirigidas a la mejora del transporte urbano de mercancías

El objetivo general de las diferentes estrategias y/o políticas aplicadas en el transporte urbano de mercancías tienen como finalidad minimizar su coste total (social, medioambiental, económico...) (De Marco et al., 2018). Esto se puede llevar a cabo mediante una mejora de uno o varios objetivos más específicos: económicos, de eficacia, de seguridad vial, medioambientales, de infraestructura o de estructura urbana (Ogden, 1992). Las diferentes estrategias y/o políticas desarrolladas pueden seguir diferentes clasificaciones, en la presente tesis doctoral se ha llevado a cabo la siguiente clasificación:

- Medidas para regular el acceso de los vehículos de mercancías a los centros urbanos: Se trata de medidas de bajo coste para las administraciones locales y que pueden tener impactos importantes en las ciudades. Dentro de esta medida pueden incluirse restricciones de acceso debido a las características del vehículo (peso o potencial contaminante) o restricciones horarias.
- Medidas para diseñar y gestionar el aparcamiento de los vehículos de mercancías: se trata de disponer un espacio adecuado de aparcamiento para los vehículos de mercancías para poder entregar y/o recoger mercancías, lo que se conoce como las zonas de carga y descarga.
- Medidas dirigidas a mejorar la cadena de suministro en ámbito urbano: constituyen las medidas relativas a la instalación de centros de consolidación urbanos y al ruteo de los vehículos de mercancías.
- Otro tipo de medidas: existen otro tipo de medidas como son los sistemas inteligentes de transporte (ITS), cargo por congestión o aplicación de políticas fiscales, uso de carriles reservados o transporte combinado de pasajeros y mercancías.

En la siguiente tabla (Tabla 1), se clasifican y resumen diferentes estudios que analizan diferentes estrategias dirigidas a la mejora del transporte urbano de mercancías, y

posteriormente se describirán aquellos estudios más relevantes para el desarrollo de esta tesis doctoral.

Medidas para regular el acceso de vehículos de mercancías	Restricciones por peso, dimensiones del vehículo o nivel de contaminación	<ul style="list-style-type: none"> - Anderson et al., 2005 - Comi et al., 2008 - Danielis et al., 2010 - Filippi et al., 2010 - Nuzzolo et al., 2016
	estudios y análisis del impacto de la emisión de contaminantes	<ul style="list-style-type: none"> - Browne et al., 2007 - Comi et al., 2008 - Browne et al., 2011 - Romero et al., 2014
	Restricciones de acceso por tiempo	<ul style="list-style-type: none"> - Quak & De Koster, 2006 - Holguín-Veras et al., 2008 - Danielis et al., 2010 - Holguín-Veras et al., 2011 - Nuzzolo et al., 2016 - Akyol & De Koster, 2018
	Medidas de cargo por congestión	<ul style="list-style-type: none"> - Anderson et al., 2005 - Silas & Holguín-Veras, 2009 - Danielis et al., 2010
Medidas dirigidas a mejorar la cadena de suministro	Planificación de rutas	<ul style="list-style-type: none"> - Holguin-Veras & Thorson, 2000 - Crainic et al., 2009 - Russo & Comi, 2010 - Nuzzolo & Comi, 2011 - Nuzzolo et al., 2012
	Centros de consolidación urbana UCC	<ul style="list-style-type: none"> - Crainic et al., 2004 - Crainic et al., 2009 - Danielis et al., 2010 - Filippi et al., 2010 - Paddeu, 2018

	Efecto del comercio electrónico	<ul style="list-style-type: none"> - Visser & Lanzendorf, 2004 - Rougès & Montreuil, 2014 - Dablang, 2019 - Janjevic & Winkenbach, 2020
	Transporte combinado de pasajeros y mercancías	<ul style="list-style-type: none"> - Kikuta et al., 2012 - Ghilas et al., 2013, 2016
Medidas para regular el aparcamiento de los vehículos de mercancías	Regulación y diseño de zonas de C/D	<ul style="list-style-type: none"> - Browne et al., 2007 - Danielis et al., 2010 - Nuzzolo et al., 2016 - Alho et al., 2018
	Ilegalidades en torno a las zonas de C/D	<ul style="list-style-type: none"> - Dezi et al., 2010 - Cherrett et al., 2012 - Alho & e Silva, 2014; De Oliveira & Guerra, 2014 - Nourinejad & Roorda, 2017
	Sistema de reservas de bahías de C/D	<ul style="list-style-type: none"> - McLeod & Cherrett, 2011 - Patier et al., 2014 - Comi et al., 2017 - Comi, 2018 - Yang et al., 2018

Tabla 1. Principales estudios dirigidos a la mejora del transporte urbano de mercancías

Además, se han revisado los proyectos con mayor impacto que de una manera u otra estudiaron y aplicaron medidas para mejorar el transporte urbano de mercancías (2):

PROYECTO	AÑO	DESCRIPCIÓN
COST 321	1994-1998	COST 321: Urban Goods Transport
IDIOMA	1999-2011	Innovative Distribution with intermodal freight operation in metropolitan areas: el objetivo principal es demostrar las posibilidades de mejora de la distribución de mercancías dentro de áreas metropolitanas.

MOSCA	2001-2003	Decision Support System for Integrated Door-to-Door Delivery: Planning and Control in Logistic Chains: el objetivo es encontrar rutas para entregas online, en función del tráfico variable, para gestionar preferencia de localización de entregas.
BestUFS I	2000-2004	Best Urban Freight Solutions I, tiene varios objetivos: Regular el acceso a la ciudad, el aparcamiento y el tiempo de acceso; el comercio electrónico, el estudio sobre el consorcio público-privado y el análisis de imponer peajes y cargos
BestUFS II	2004-2008	Best Urban Freight Solutions II: amplía los estudios desarrollados en BestUFS I e incluye experimentos e incentivos para uso de vehículos limpios y el transporte de residuos en las ciudades.
START	2007-2009	Short Term Actions to Recognize Transport of goods (START): trata temas como la restricción de accesos, consolidación de entregas, incentivos para uso de vehículos limpios y altos factores de carga, y adoptar estrategias de consolidación; además incluye "discusiones" entre diferentes agentes implicados en la cadena de transporte
SMARTFREIGHT	2008-2011	Desarrolla nuevas medidas de gestión del tráfico de mercancías a través de los servicios abiertos ICT (infraestructuras comunes de telecomunicaciones), equipo de a bordo y la infraestructura de comunicación inalámbrica integrada...
TURBLOG-WW	2009-2011	Transferability of Urban Logistics Concepts and Practices from a World Wide Perspective. Con el objetivo de transmitir conocimiento entre Europa y america latina.
FREILOT	2009-2011	Urban Freight energy efficiency pilot, proyecto integrado dentro del proyecto ECOSTAND. En él se estudia la prioridad selectiva a vehículos aptos, limitadores de velocidad adaptativos y de aceleración, soporte eco-driving y reserva de espacio de carga/descarga a tiempo real
SUGAR	2008-2012	Sustainable Urban Goods Logistics Achieved by Regional and local policies. (SUGAR). Este proyecto se centra en el problema de ineficiencia e ineficacia de la gestión de la distribución urbana de mercancías.
CITYLOG	2010-2012	sustainability and efficiency of city logistics: se recolecta las necesidades de los stakeholders para mejorar servicios telemáticos orientados a la logística, la tecnología de los vehículos y unidades de carga innovadoras, planificación dinámica a tiempo real....
C-LIEGE	2011-2013	Clean Last mile transport and logistics management for smart and efficient local governments in Europe: tiene como objetivo definir políticas y medidas comunes para un transporte urbano de mercancías eficiente energéticamente de gestión de la demanda y planificación a través de un enfoque entre stakeholders publicos y

		privados dirigido a reducir impactos energéticos y medioambientales
CYCLELOGISTICS	2011-2014	CYCLELOGISTICS Move goods by cycle: estudia la distribución de mercancías en bicicleta.
STRAIGHTSOL	2011-2014	Strategies and measures for smarter urban freight solutions: Aplica diferentes estrategias en diversas ciudades, y el proyecto trata de asesorar el impacto de las medidas aplicadas
ENCLOSE	2012-2014	Energy efficiency in City Logistics Services: estudia la eficiencia de los servicios logísticos en centros históricos de ciudades europeas de tamaño pequeño o medio.
LAMILO	2013-2015	Last Mile Logistics. Desarrolla una herramienta de información online para minimizar la congestión y la contaminación del aire y sonora cuando se desarrollan ciertos planes sostenibles. Esos planes son: creación de centros de distribución urbana, uso de vehículos eléctricos, experimentos con flota (transporte con trenes de pasajeros) etc.
BestFact	2012-2016	Best Factory for Freight Transport: estudia la logística urbana de manera eficiente y hace uso de las nuevas tecnologías para mejorarlo (efreight)
SMARTSET	2013-2016	Sustainable MARKETdriven Terminal Solutions for Efficient freight Transport (SMARTSET): Mejorar el uso de las terminales de mercancías, mediante incentivos y regulaciones, uso de vehículos limpios y a través de modelos de negocio
DOROTHY	2013-2016	Investigación e implementación de la logística urbana responsable con el medio ambiente.
FR-EVUE	2013-2017	Freight Electric Vehicles in Urban Europe: El objetivo es demostrar que operar con vehículos eléctricos en la última milla ofrece descarbonatación del sistema de transporte.
GALENA	2015-2017	Galileo-based solutions for urban freight transport, tiene como objetivo monitorear el transporte urbano de mercancías que las entregas se realicen de forma eficiente.
SOLEZ	2016-2019	SOLEZ tiene como objetivo la movilidad sostenible y el impulso de las zonas LEZ
LOGISTAR	2018-2021	LOGISTAR propone técnicas mejoradas de gestión de datos en tiempo real para mejorar la planificación y optimizar la cadena de suministro.

Tabla 2. Proyectos con mayor impacto que aplicaron medidas para mejorar el transporte urbano de mercancías.

2.3.1. Medidas para regular el acceso de los vehículos de mercancías

Las medidas o políticas dirigidas a mejorar el tráfico de mercancías mediante diferentes tipos de restricciones de acceso a la ciudad, pueden proporcionar soluciones eficaces (Anderson et al., 2005). Dichas restricciones pueden ser de diferentes tipos: en función del peso y/o dimensiones del vehículo de mercancías, del potencial contaminante del vehículo y su clasificación medioambiental o de la hora del día a la que el vehículo accede al centro de la ciudad. Todas estas restricciones se describen a continuación:

A. Restricciones de acceso por peso o dimensiones del vehículo

Las restricciones de acceso por peso, se determina según la masa máxima autorizada (MMA) del propio vehículo. Un ejemplo de esta restricción es el caso de la ciudad de Santander, en la que los vehículos de MMA superior a 16 Toneladas tienen prohibida la circulación por el casco urbano de la ciudad, aunque en casos especiales, se conceden autorizaciones. Además, los vehículos de mercancías que superen las 8 toneladas o dimensiones especiales necesitarán autorización previa para realizar actividades de carga y descarga (Santander, 2016). Existen otros casos como, por ejemplo, en Ámsterdam que no se permiten camiones de más de 7.5 toneladas o en Londres mayores de 16 toneladas. En cuanto a las restricciones según la dimensión del vehículo, París antes establecía una restricción de acceso para vehículos mayores de 16 m², o 24 m² (Danielis et al., 2010), aunque este tipo de restricción ya no se aplica actualmente, aplicándose ahora restricciones en función de las emisiones de contaminantes de los vehículos, tal y como se describe a continuación.

B. Zonas de baja emisión de contaminantes

Se trata de zonas en las que está restringido el acceso según las características de los vehículos, principalmente la capacidad de contaminación del aire, aunque en algunos casos también de contaminación acústica. Las zonas de baja emisión de contaminantes (LEZ, Low Emission Zone), se establecieron en 1966 en algunas ciudades de Suecia (Estocolmo, Gotenbugo y Malmo), con el objetivo de reducir emisiones y ruido

(Rapaport, 2002). Londres implemento la LEZ en 2008, y desde su implementación se ha observado un aumento general de los vehículos de mercancías, y un cambio en la tipología de los mismos: se observa una reducción de vehículos pre-Euro III y un aumento de vehículos comerciales ligeros y articulados con mejor comportamiento ambiental. Estos cambios han dado lugar a una disminución de la concentración de partículas de entre el 2.46-3.07 %, sin embargo, apenas hay diferencias en las concentraciones de NOx (Ellison et al., 2013). Además, también se aplican cargos por congestión, es decir, el pago de peajes a cierta tipología de vehículos para poder acceder a la LEZ. El objetivo es reducir los niveles de tráfico y con ello reducir la emisión de contaminantes. Las LEZ también han sido implementadas en otras ciudades europeas obteniendo diferentes reducciones de concentración de contaminantes (Holman et al., 2015).

C. Restricciones de acceso por tiempo

El objetivo es restringir el acceso de todos o cierto tipo de vehículos de mercancías durante un periodo de tiempo dentro del día, es decir, creando ventanas temporales en las que se permite el acceso a ciertas zonas (Zhao et al., 2019). Esta medida puede ayudar a reducir el impacto que los vehículos de mercancías causan, como son la contaminación, vibraciones, ruidos etc. Sin embargo, hay que evaluar la implementación de esta medida, para que no produzca efectos negativos como un coste extra para los transportistas debido a la necesidad de un mayor número de vehículos o del aumento de la longitud de la ruta (Muñuzuri et al., 2013).

Un caso específico de las restricciones horarias es la distribución nocturna de mercancías . Holguín-Veras et al. (2011) realizaron una prueba piloto para analizar el impacto de la distribución nocturna en Manhattan entre las 7.00 p.m. y las 6 a.m. Para llevarlo a cabo, los comerciantes que participaron en el estudio recibían incentivos económicos. Los resultados mostraron beneficios económicos, de tiempo de viaje y de contaminación medioambiental, así como la predisposición de los participantes en el estudio a seguir usando distribución nocturna aun sin tener incentivos económicos. Esta iniciativa ha tenido un éxito considerable en Nueva York. Mommens et al. (2018) evaluaron la

distribución nocturna a supermercados a nivel macro. Obtuvieron que el mejor escenario se obtiene cuando se permite como máximo una entrega por la noche y permitiendo más entregas durante el día, de esta manera se compensan los beneficios e inconvenientes de la distribución nocturna. Otro aspecto a tener en cuenta es que, para llevar a cabo el reparto nocturno, muchas veces es necesario el uso de vehículos más silenciosos para evitar molestias. Simoni & Claudel (2018) simularon los vehículos aparcados en doble fila a escala microscópica teniendo en cuenta diferentes medidas para minimizar las perturbaciones que estas ilegalidades producen. Entre estas medidas se encuentran las entregas nocturnas o la prohibición realizar entregas en calles críticas. La primera medida presenta beneficios tanto para el tráfico general como para la eficiencia de las operaciones de carga, mientras que la segunda medida no dio resultados tan claros.

D. Otras restricciones de acceso

Otros tipos de restricciones de acceso encontrados en el análisis del estado de arte han sido:

- Restricciones según el factor de carga: esta medida tiene como objetivo mejorar la utilización de los vehículos a través de la mejora de los índices de ocupación de carga del mismo. Por ejemplo, en Copenhague se usa esta medida para acceder a la zona medieval del centro de la ciudad permitiendo el acceso a vehículos con un factor de carga mayor al 60% y además con camiones de menos de 8 años de antigüedad (Geroliminis & Daganzo, 2005). Aunque hay que considerar que bajo ciertas condiciones aumentar el factor de carga da lugar a un aumento de los costes totales y de las emisiones (Arvidsson, 2013).
- Restricciones según el tipo de mercancías: en la mayoría de los centros de las ciudades el acceso de ciertas tipologías de mercancías está prohibido, como, por ejemplo, los vehículos con mercancías peligrosas.
- Restricción de acceso según políticas fiscales: esta medida establece un cargo que pueden ser impuestos como cargos de congestión o como áreas con licencia.

También pueden ser definidas de acuerdo con el tipo de vehículo y/o a ventana temporal y/o conducción por terceras personas o cuenta ajena. Las ciudades de Londres, Estocolmo y Milán son ejemplos donde se aplicaron políticas fiscales.

2.3.2. Medidas dirigidas a mejorar la cadena de suministro en ámbito urbano

Las medidas descritas en el apartado anterior regulan el acceso de vehículos a las ciudades. Una vez que acceden, su objetivo es llegar hasta su destino final. En ese proceso, existen algunas medidas para minimizar o corregir el impacto del transporte de mercancía mediante la mejora de la cadena de suministro. Existen numerosos investigadores que han modelado y simulado la cadena de suministro (Schoenherr, 2009). Por ejemplo, Reiner & Trcka (2004) modelaron y diseñaron la estructura de la cadena de suministro para una empresa de comida. En este proceso de mejora de la cadena de suministro se incluye la planificación de rutas de mercancías teniendo en cuenta los puntos de recogida y de entrega, así como los centros de consolidación urbana (UCC).

A. Planificación de rutas

La planificación de las rutas que hacen los transportistas en las ciudades también mejora los aspectos negativos que produce el transporte urbano de mercancías. Una buena planificación de rutas minimiza los costes del sistema: costes de operación, de procesamiento de información y de transporte, así como medioambientales, como por ejemplo, considerando las emisiones de carbono (Guo et al., 2017). En la planificación de rutas para distribución de alimentos perecederos la duración de la ruta es un factor muy importante en la planificación. Hsu et al. (2007) desarrollaron modelos para obtener las rutas de reparto óptimas para comida perecedera, teniendo en cuenta el tiempo de viaje y la variación de temperatura con el tiempo. Es por ello que, su objetivo era no solo minimizar los costes fijos de reparto, sino también considerar la distancia

recorrida, el deterioro de la comida, el consumo de energía de los vehículos y la penalización por exceder los tiempos estipulados. Otros investigadores, sin embargo, han realizado estudios más novedosos, como las cadenas de suministro Smart. Estas se caracterizan por estar instrumentadas (ej. Con sensores), automatizadas, interconectadas e integradas, así como por ser inteligentes (optimizan el rendimiento) e innovadoras (Wu et al., 2016). Las cadenas de suministro Smart además, permiten la planificación dinámica de las rutas de los vehículos de mercancías en tiempo real (Alvarez et al., 2018). Letnik et al. (2018) diseñaron un sistema de información apoyado en dispositivos móviles inteligentes (smartphone o Tablet) para la gestión dinámica de las rutas de mercancías considerando el tráfico de la ciudad. Esto permite una mayor flexibilidad en las entregas en los centros de las ciudades con espacio limitado. Otra forma de realizar una gestión dinámica es mediante asignación dinámica de las zonas de carga/descarga óptimas (número y localización).

B. Centros de consolidación urbana (UCC)

Los centros de consolidación urbana o centros de distribución urbana son instalaciones logísticas situadas en las proximidades del área geográfica (centro urbano, área metropolitana...) o centro de distribución comercial al que sirve. En ellos se reciben las mercancías remitidas por los fabricantes o mayoristas y salen los envíos consolidados y organizados, y además se realizan otros servicios de valor añadido. El objetivo de los UCC es reducir el número de vehículos aumentando los factores de carga y reduciendo las frecuencias de los vehículos mediante la eliminación de vehículos en vacío. Todo ello da lugar a una disminución de la congestión y de las emisiones contaminantes.

Existen diferentes estudios para determinar la localización y el tamaño óptimo de los UCC (Gutjahr & Dzubur, 2016; Olsson & Woxenius, 2012), así como estudios que analizan los efectos e impactos que estos producen (Allen et al., 2012). Por ejemplo, Filippi et al. (2010) evaluaron diferentes políticas en el centro de Roma, entre ellas la creación de centros de distribución urbana (tiempo y coste de viaje, consumo, contaminación...). De todas ellas obtuvieron que la mejor era la creación de un UCC.

C. Puntos de recogida y entrega

Los puntos de recogida y entrega son pequeños depósitos o cajas en los que los consumidores pueden recoger las mercancías adquiridas por correo o internet a la hora del día más conveniente. En sus primeros intentos de utilización a principio del siglo XXI tuvieron poco éxito (Cairns et al., 2004), sin embargo han ido ganando importancia rápidamente, entre otros motivos gracias al auge del comercio electrónico y las entregas a domicilio. Ya que, uno de los problemas de las entregas a domicilio es el porcentaje de entregas fallidas, es por lo que los puntos de recogida son una alternativa potente que minimiza tanto las consecuencias económicas como las consecuencias medioambientales de las entregas fallidas por los transportistas (Edwards et al., 2010). En la aplicación de esta medida también es necesario considerar los movimientos de los receptores de mercancías hasta el punto de recogida. Por este motivo, el estudio de la localización y tipología de los puntos de recogida es esencial para que esta medida sea respetuosa con el medioambiente (Collins, 2015). Otros estudios, sin embargo, analizan las consecuencias del su uso de los puntos de recogida para los centros comerciales, minoristas y para la movilidad en general (Weltevreden, 2008).

D. Transporte combinado de pasajeros y mercancías

Existen otro tipo de medidas o estrategias como es el transporte combinado de pasajeros y mercancías. En otras palabras, usar las líneas de transporte público de la ciudad para transportar mercancías. Esta medida fue investigada por Kikuta et al. (2012), quienes llevaron a cabo una prueba piloto en Sapporo (Japón), una ciudad en la que la efectividad del transporte decrece debido a las grandes nevadas. Se realizó la prueba piloto entre dos zonas unidas por una línea de metro, y se obtuvieron resultados positivos que se confirmaron con encuestas realizadas a los ciudadanos. Sin embargo, esta medida ha sido estudiada por otros investigadores sin obtener resultados tan satisfactorios debido a que la fiabilidad de esta medida se veía disminuida debido a causas adicionales de retrasos y daños en la carga (Ghilas et al., 2016).

2.3.3. Medidas para regular el aparcamiento de los vehículos de mercancías

Las medidas anteriores, regulan el acceso de los vehículos de mercancías en las ciudades, ya sea en toda la ciudad o en un espacio determinado, o en un periodo de tiempo dado. Posteriormente se han analizado medidas para gestionar el recorrido que realizan los vehículos desde que acceden a las ciudades hasta que llegan a su destino final. Dichos vehículos, necesitan un espacio para poder estacionar y realizar sus operaciones de carga y/o descarga, a estas zonas se les conoce como zonas de carga y descarga y están reservados exclusivamente para uso de vehículos de mercancías. Estas zonas de carga/descarga están compuestas por bahías de carga/descarga, es decir, el espacio ocupado por un vehículo de mercancías en una bahía, y la capacidad de una zonas de C/D es igual al número de bahías de C/D que hay en la misma.

Para cualquier estudio realizado en torno a las zonas de carga y descarga, analizar, comprender y revisar los datos recolectados es vital para poder explorar diferentes soluciones y realizar un diseño y gestión eficaz de las zonas de carga/descarga (Dalla Chiara & Cheah, 2017). El diseño y regulación es esencial para garantizar su buen uso, y evitar que se produzcan ilegalidades en torno a las misma. Sin embargo, esto no siempre ocurre, y existen experiencias y estudios sobre las ilegalidades en las zonas de carga y descarga.

A. Regulación y diseño de las zonas de aparcamiento de mercancías

Los vehículos de mercancías necesitan un espacio para aparcar y realizar sus operaciones de carga y descarga. La regulación de estos espacios viene determinada por las ordenanzas municipales de cada ciudad.

Algunas ciudades establecen normativas en las que es obligatorio que los edificios (que desarrollen cierto tipo de actividades) cuenten con espacios de carga/descarga propios, como es el caso de la ordenanza municipal de Barcelona (Barcelona, 2007). Sin embargo, el lugar más común en el que los vehículos realizan sus operaciones son las zonas de carga y descarga (C/D) ubicadas en el espacio público urbano. La normativa sobre el uso de las zonas de C/D, implica regular el tiempo máximo permitido de estacionamiento para así asegurar la rotación de vehículos, regular que tipología de vehículos de mercancías pueden usarlas y regular la o las franjas horarias en las que las zonas de C/D están en funcionamiento para uso exclusivo de vehículos de mercancías. Un caso particular de estas regulaciones son los carriles multiusos. Estos carriles multiuso se caracterizan por permitir usos (carril de circulación, zona de C/D o estacionamiento para residentes), en diferentes franjas horarias y por diferentes vehículos. El proyecto BESTFACT (BESTFACT, 2013b) estudió la implementación de este tipo de carriles en Bilbao (España).

Las diferentes regulaciones de aparcamiento en las ciudades, varían en cada ciudad del mundo, y están implícitas en la regulación sobre restricción de acceso a la ciudad (Hawaii, 2018; Santander, 2016). Estas regulaciones han sido estudiadas y analizadas para comprender su influencia (Browne et al., 2007; Nuzzolo et al., 2016). Quak & De Koster (2006) evaluaron 5 escenarios con diferentes franjas horarias para evaluar el impacto social, ambiental y económico de cada una de ellas. También hay que tener en cuenta, que los proveedores y los transportistas tienen una gran influencia sobre las ventanas temporales de entrega, en lo referente a la aceptación de dichos cambios (Domínguez et al., 2012).

Por otro lado, existen estudios para mejorar el diseño de las zonas de carga/descarga. Este diseño se lleva a cabo mediante la optimización del número, tamaño y/o localización de zonas de carga y descarga, con el objetivo de que el transportista se encuentre una bahía de C/D libre o en su defecto que el tiempo de espera sea mínimo (Lopez et al., 2019). Aiura & Taniguchi (2005) desarrollaron un modelo para determinar la localización óptima de las zonas de C/D, pero partiendo de un número de zonas fijado previamente. Tuvieron en cuenta el comportamiento tanto de vehículos de mercancías como de vehículos de tráfico privado, y minimizaron el coste total de demora, costes fijos, de

operaciones de aparcamiento y de espera. Otros estudios van un paso más allá, y proponen metodologías para optimizar las tres variables (número, tamaño y localización). Como es el estudio de Dezi et al. (2010), en el que la metodología desarrollada optimizaba primero el tamaño, después el número y finalmente la localización de las bahías de C/D. Otros estudios, sin embargo, no optimizan su configuración sino que la varían para mejorar la situación actual. Como es el caso de Alho et al. (2018), que variaron la configuración de las zonas de C/D (número, tamaño y localización) para reducir el impacto que los vehículos en doble fila producen. O el estudio de Muñuzuri et al. (2017), en el que estimaron el número de zonas de C/D y la ubicación óptima, hasta encontrar el escenario que mejorase el nivel de servicio actual. Esta metodología la aplicaron en cuatro calles de Sevilla (España) obteniendo una reducción importante de la distancia recorrida a pie por el transportista.

B. Ilegalidades en torno a las zonas de carga y descarga

En los centros de las ciudades, en el que el espacio escasea, existe una competencia entre usuarios de vehículos privados de pasajeros y vehículos de mercancías para satisfacer las necesidades de aparcamiento de ambos. Existe una relación entre la demanda de aparcamiento, la oferta de aparcamiento y el número de vehículos de mercancías que aparcan ilegalmente (Wenneman et al., 2015). Y uno de los problemas existentes es, que en muchas ocasiones la demanda solicitada por los transportistas es mayor que la oferta real de zonas de carga y descarga, ya que estas están ocupadas, en mayor o menor grado, por vehículos que no son de mercancías (Alho & e Silva, 2014; De Oliveira & Guerra, 2014). Uno de los motivos por los que se usan las zonas de C/D de manera ilegal, es debido a las políticas de control existentes. Nourinejad & Roorda (2017) analizaron las reacciones de los conductores frente a dichas políticas obteniendo que la probabilidad de ser multado aumenta con el tiempo de estacionamiento y el nivel de vigilancia de la legislación. Y que el aumento económico de la multa o de la aplicación de la ley dificultará el estacionamiento ilegal, pero la recaudación económica obtenida debido a las multas se mantiene aproximadamente constante.

Dezi et al. (2010) argumentan que en diversas ciudades se ha demostrado que un alto porcentaje de zonas de carga/descarga están ocupadas ilegalmente y como consecuencia muchos conductores no las usan por ese motivo. En la ciudad de Bolonia (Italia) se realizó una investigación en las zonas de carga y descarga en la LTZ (low traffic zone), obteniendo entre otros datos, que durante la realización de las encuestas más del 50% de las zonas de carga y descarga estaban ocupadas ilegalmente.

Como consecuencia de estas ilegalidades los vehículos de mercancías aparcan en doble fila para hacer sus operaciones de carga y descarga, ya sea a lo largo de la calle o en las intersecciones cercanas. Esto lo que provoca es que el resto de vehículos que se mueven por la ciudad se vean afectados por ello, creandose así perturbaciones sobre el tráfico y aumentando la congestión y por ende, la contaminación (Iwan et al., 2018). Estas perturbaciones fueron estudiadas por Alho et al. (2018), los cuales realizaron una simulación dinámica en zonas de C/D con diferentes configuraciones y cumpliendo, en diferentes grados, la restricción de uso de zonas de C/D solo por vehículos autorizados, para así poder comparar las perturbaciones que se producen en el tráfico. Además, a esto añadir que aparcar en doble fila también implica un coste para los operadores de transporte debido a las posibles multas y a que ellos a su vez también se ven afectados por la congestión generada. Simoni & Claudel (2018) simularon los vehículos aparcados en doble fila a escala microscópica teniendo en cuenta diferentes medidas para minimizar las perturbaciones que se producen. Entre estas medidas se encuentran las entregas nocturnas o la prohibición realizar entregas en calles críticas. La primera medida presenta beneficios tanto para el tráfico general como para la eficiencia de las operaciones de mientras que la segunda medida no dio resultados tan claros.

Muchos investigadores durante la recolección de datos, para la realización de diferentes investigaciones, han obtenido que el grado y/o tipología de ilegalidades en torno a las zonas de carga/descarga es elevado. Cherrett et al. (2012) realizaron una revisión de 30 estudios realizados en Reino Unido y examinaron cómo influyen las características de las entregas y de los vehículos en el uso de las zonas de carga y descarga. Así como, la variación de las entregas a lo largo del día, de la semana y del año. Además, 4 de esos estudios examinaron si las actividades de carga/descarga se realizaban fuera de la legalidad (aparcar en un lugar no permitido como en paradas de autobús o en doble fila,

o superar el tiempo permitido) obteniendo que las ilegalidades variaban desde un 20% en el estudio de Wallington (2005) y Regent Street (2007), a un 69% en el Ealing (2004) y hasta llegar a un 86% en el estudio Market Place. Alho & e Silva (2014) evaluaron el nivel de servicio de las zonas de carga/descarga, así como el nivel de aparcamiento ilegal en Lisboa, y observó que los vehículos que no eran de mercancías eran el 80% de la demanda.

C. Sistema de reservas de las bahías de carga y descarga

Otras medidas para mejorar esta situación están enfocadas en sistemas de reserva de las zonas de carga y descarga para los vehículos de mercancías y servicios (Comi, 2018). McLeod & Cherrett (2011) investigaron esta medida en la que los usuarios podían reservar con antelación una plaza de carga y descarga en una de las calles de Winchester. Yang et al. (2018) también propusieron un sistema de reserva previa de bahías de C/D con el objetivo de mejorar el bienestar social del sistema. Para que el sistema de reservas sea efectivo es necesario incluir un sistema de control, es decir, hacer uso de los sistemas inteligentes de transporte (ITS) (Patier et al., 2014). Los ITS son aplicaciones cuyo objetivo es proporcionar servicios relacionados con diferentes modos de transporte y con la gestión del tráfico, y permitir a los usuarios estar mejor informados, logrando una red de transporte más segura, con mayor coordinación y más eficaz. El proyecto BESTFACT hace uso de las nuevas tecnologías, el caso I-Ladezonen (BESTFACT, 2013a) realiza un monitoreo de la ocupación de las zonas de carga y descarga para controlar su ocupación diferenciando entre vehículos de mercancías o coches privados. Otro paso más adelante es, el monitoreo y control de las zonas de carga y descarga a tiempo real, que es lo que se aplicó en el proyecto DynaLOAD en la zona LEZ de Roma (Comi et al., 2017). El objetivo era optimizar en tiempo real el uso de las zonas de carga y descarga. Esto permite a los operadores logísticos reservar zonas de carga y descarga, además de ofrecer sugerencias sobre el tour de entregas.

D. Otras mediadas de gestión de las zonas de carga y descarga

Existen otro tipo de medidas de gestión de las zonas de carga y descarga. Roca-Riu et al. (2017) estudiaron otra medida para hacer frente a los vehículos de mercancías aparcados en doble fila, a esta medida la definieron como Dynamic Delivery Parking Sports. Este concepto se basa en el uso dinámico del carril exterior de una calle, espacio en el que actualmente paran en doble fila los vehículos de mercancías. El uso de ese espacio se analiza bajo ciertas condiciones, y es función de la demanda de tráfico a lo largo del día. Este carril puede ser usado como carril de paso de vehículo o como espacio para que estacione un vehículo de mercancías para realizar sus operaciones. Simularon esta medida para validar el modelo y estimar las demoras en comparación con la situación actual, con aparcamiento en doble fila, y se muestra que con este sistema se reducen las demoras y solo se producen interrupciones a nivel local.

Capítulo 3

Modelos propuestos para mejorar el transporte urbano de mercancías

3.1. Introducción

Tras la revisión del estado del arte, y una vez analizados e identificados cuales son los problemas más acuciantes en la actualidad en materia de transporte urbano de mercancías, así como aquellas medidas y acciones prácticas que se han llevado a cabo para hacer frente a dichos problemas, en este capítulo se presentan las herramientas metodológicas y los modelos propuestos y desarrollados para tratar de resolver la problemática planteada.

Si bien los problemas y desafíos en el ámbito del transporte urbano de mercancías son muy amplio, como ha quedado patente en el análisis del estado del arte, esta tesis pone el foco en interacción del vehículo de mercancías en el tráfico, la movilidad y el espacio de la ciudad. Para ellos se han diferenciado dos situaciones muy distintas, pero con el común denominador del destacado impacto que producen sobre el tráfico y la movilidad de la ciudad.

En primer lugar, el transporte de punto a punto entre las zonas de producción que se encuentran fuera del ámbito urbano y el destino final que se encuentra inmerso en la trama urbana. En concreto aquellos transportes que requieren grandes vehículos de dimensiones considerables y que incluso su frecuencia sea elevada, como el caso de aprovisionamiento de materiales en una gran obra infraestructural en el casco urbano.

Tanto si hablamos de transporte de mercancías que posteriormente serán distribuidas en la ciudad como en el caso del aprovisionamiento de materiales el objetivo del modelo desarrollado es optimizar el coste global del sistema de transporte desde el punto de vista social, económico y ambiental.

En esta tesis en particular se desarrolla un modelo de optimización-simulación enfocado a planificar y gestionar los vehículos de gran dimensión que, en situaciones concretas, específicas y generalmente planificadas, circulan por la ciudad con una alta frecuencia. Con este primer modelo se hace frente a uno de los objetivos específicos de la presente tesis.

En segundo lugar, se aborda el problema que gira en torno a la distribución urbana de mercancías con en vehículos de menor dimensión y su interacción en las zonas de carga/descarga. En este caso un objetivo de sumo interés está en optimizar el dimensionamiento del sistema que reportaría claros beneficios en la fluidez del tráfico, así como en la gestión del espacio urbano, muy escaso en estos entornos.

En particular en este segundo bloque, para optimizar el espacio urbano de la ciudad que los vehículos de mercancías utilizan para realizar sus operaciones de carga y descarga es importante explorar el comportamiento entorno a las zonas de carga y descarga y conocer el uso de las mismas. Para ello se ha desarrollado una metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga con el objetivo de identificar y cuantificar su impacto en la optimización del espacio urbano, y los posibles beneficios que se lograrían en caso de modificación del uso de estas. Una vez comprendido el uso de las zonas de carga y descarga, se han desarrollado dos modelos: un modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga, y, en segundo lugar, un modelo en el que las paradas de autobús sean de uso compartido, es decir, pueden ser utilizadas por los autobuses, los cuales disponen de un uso preferente, y también por vehículos de distribución de mercancías.

Es importante definir lo que son las zonas de carga y descarga (C/D) y las bahías de carga (DB). Las zonas de C/D están formadas por un número finito de DB, las cuales son utilizadas por los vehículos de mercancías para realizar sus operaciones. Dicho de otro modo, la capacidad de una zona de C/D es igual al número de DB de dicha zona de C/D.

En el siguiente esquema se presentan los modelos desarrollados para mejorar el transporte urbano de mercancías (Figura 4):

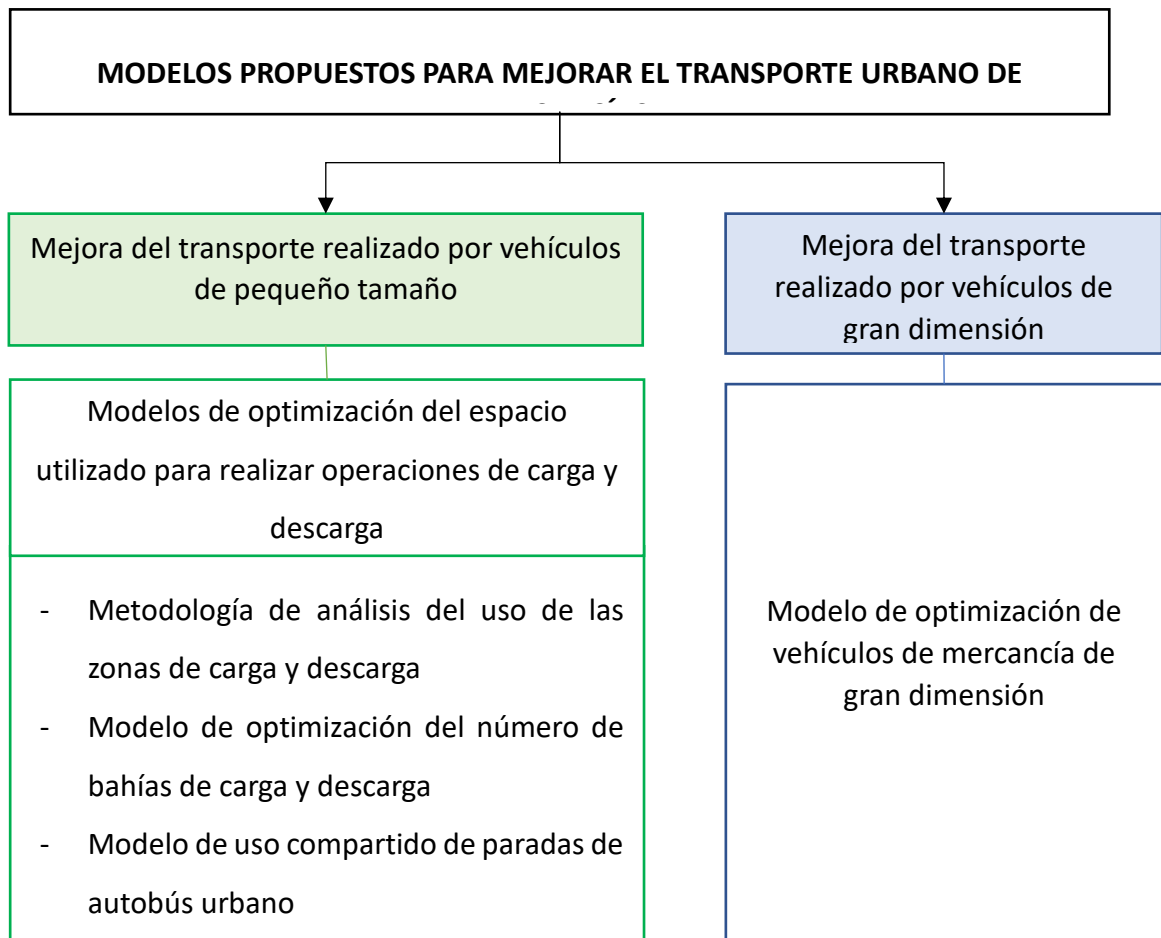


Figura 4. Modelos desarrollados para mejorar el transporte urbano de mercancías

3.2. Modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga

El espacio público en los centros de las ciudades es cada vez más escaso, por lo que el uso de ese espacio requiere ser sometido a procesos de optimización con distintos criterios. Por este motivo uno de los objetivos de esta tesis doctoral es optimizar desde un punto de vista multicriterio el espacio utilizado por los vehículos de mercancías. Estos vehículos acceden al centro de las ciudades y recorren las mismas con unas rutas determinadas y con unos puntos de entrega/recogida de mercancía específicos, por lo que necesitan un espacio de estacionamiento para realizar sus operaciones, las zonas de carga y descarga.

Es importante conocer y analizar el uso que se hace de estas zonas de carga y descarga, y para ello se ha desarrollado una metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga para así ser conocedor de la situación, entender el fenómeno y comportamiento en las mismas y determinar la relación entre el grado de utilización de las mismas y los impactos generados por tal comportamiento. Además, el uso de las zonas de carga y descarga puede modificarse con respecto a la situación actual si se aplican medidas para ello, en otras palabras, las ilegalidades que se producen pueden restringirse y por tanto reducir impactos negativos. Esta metodología plantea diferentes escenarios variando el uso de las mismas para así estimar el impacto sobre el uso del suelo público.

Posteriormente y para optimizar el espacio utilizado por los vehículos de mercancías para realizar operaciones de carga y descarga se han desarrollado dos modelos. El primero es un modelo de optimización de bahías de carga y descarga. Este primer modelo se aplica en cualquier área urbana en el que el número de bahías de carga no sea el óptimo o se quiera verificar si lo es. El segundo modelo desarrolla el uso compartido de paradas de autobús, es decir, pueden ser usadas por los autobuses, los cuales disponen de un uso preferente, y también por vehículos de mercancías. Este modelo no se puede aplicar en cualquier área urbana, sino que debe de cumplir una serie de requisitos que serán explicitados posteriormente. Si el área de estudio cumple

dichos requisitos, este modelo se podrá aplicar en combinación con el primer modelo descrito, el modelo de optimización de bahías de carga y descarga, logrando un mayor grado de optimización.

3.2.1. Metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga

La metodología planteada parte de la base de un análisis exhaustivo de datos recopilados sobre los vehículos que usan las zonas de C/D. La metodología propuesta comienza analizando tanto las características de las propias zonas de C/D: número de bahías de C/D (DB) en cada zona de C/D, tipo de calle en la que está ubicada, etc.; así como su propio uso: tipo de vehículos que las usan, hora de llegada y uso legal o ilegal. Es necesario prestar especial atención a las ilegalidades que se producen en las zonas de C/D, analizando si dichas ilegalidades se producen porque el tiempo de entrega (DT) excede el tiempo permitido y/o porque es usada por vehículos no permitidos. Estas ilegalidades producen hacen que la capacidad de las zonas de C/D disminuya y que la oferta de bahías de carga sea menor que la demanda. Cuando esto se producen los transportistas no tienen espacio en la zona de C/D y deciden aparcar sobre las aceras o en doble fila o en áreas restringidas, como zonas amarillas.

Una vez realizado el análisis, estos datos serán posteriormente utilizados para determinar cuantitativamente las consecuencias del incorrecto uso de las zonas de C/D en diferentes escenarios. Estos escenarios se caracterizan porque las situaciones de ilegalidad varían en tipología y grado de ilegalidad. Para ello se realiza una simulación de eventos discretos en cada escenario propuesto, obteniendo el número de vehículos de mercancías usando espacio de manera inadecuada simultáneamente y con ello una estimación de la superficie (m^2) de espacio público usado incorrectamente, obteniendo así el grado de influencia de cada incumplimiento de la regulación existente (Figura 5).

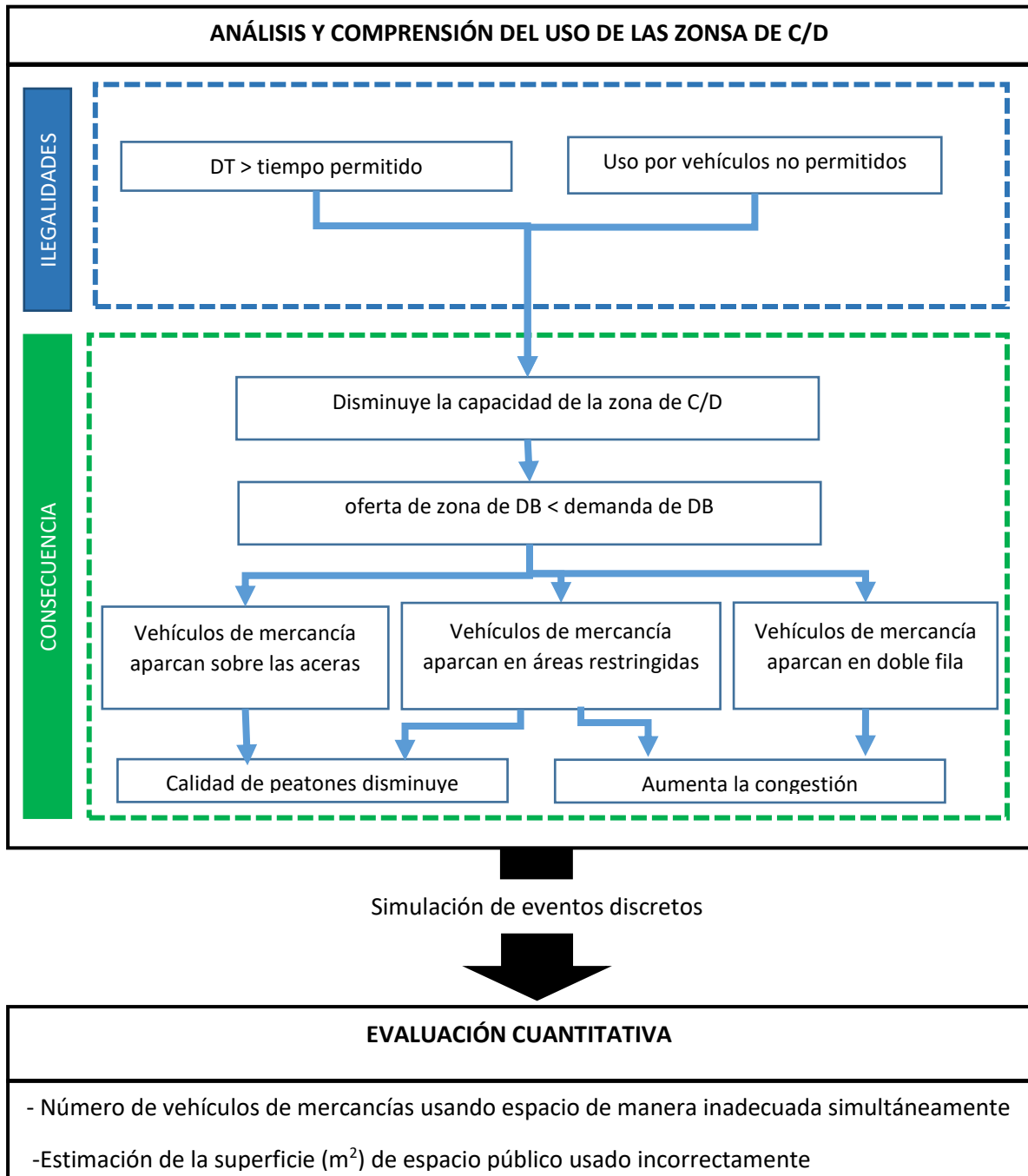


Figura 5. Esquema de la metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga

El uso que se da a las zonas de carga y descarga puede ser diferente dentro de una ciudad, en diferentes ciudades y/o en diferentes países, y pueden variar según su tipología, cantidad, localización etc. Es por ello, que es necesario tener una muestra representativa del uso de la zona de C/D y de las características de estas y su entorno, es decir, la calle.

En primer lugar, se analizan las características de las propias zonas de carga y descarga, y de la calle donde están ubicadas. Las características analizadas son:

- Capacidad de la zona de carga y descarga, es decir, el número de bahías de C/D o en otras palabras el número de vehículos que pueden estacionar simultáneamente.
- Características de la calle:
 - Calle unidireccional o bidireccional y número de carriles por sentido
 - Existencia o no de aceras
 - Limitaciones físicas en las aceras: bolardos, contenedores de basura, barandillas, losas de hormigón de protección de contenedores etc.
 - Tipos de aparcamientos próximos: coches, paradas de autobús, paradas de taxi, zonas restringidas al aparcamiento etc.
 - Tipología de intersecciones: semaforizada, sin señalizar, glorieta etc.

Las características de la calle dan lugar a diferentes posibilidades de aparcamiento ilegal: en doble fila, sobre las aceras, en zonas restringidas etc.

En la siguiente figura (Figura 6) se muestra un ejemplo de una calle en la que hay una zona de aparcamiento. Si analizamos las características de la zona de C/D y de la calle podemos observar que la zona de C/D tiene una longitud de 28 metros, es decir, tiene 5 bahías de C/D una capacidad de 5 vehículos de mercancías. La calle es unidireccional de un solo carril (impidiendo el aparcamiento en doble fila), ubicándose la zona de C/D junto a una intersección sin señalizar y con un paso de peatones al inicio de la zona de C/D. También se muestra el detalle de la calle al inicio y final de la zona de C/D, observándose que no es posible el aparcamiento sobre las aceras, ya que al inicio de la misma hay bolardos que lo impiden y al final una losa de hormigón.



Figura 6. Ejemplo de zona de C/D y calle donde está ubicada

También se analiza el uso que se realiza de las zonas de carga y descarga, que es lo que definirá el tipo y grado de ilegalidades que se producen:

- Regulación de las zonas de carga y descarga por la autoridad competente, normalmente el ayuntamiento de la ciudad.
- Distribución de llegadas a las zonas de carga y descarga
- Tipología de vehículos que las utilizan.
- Duración del estacionamiento.
- Ocupación de las zonas de carga y descarga y sus alrededores.

Una vez realizado este análisis exhaustivo se procede a evaluar cuantitativamente las consecuencias del uso ilegal que se produce en las zonas de C/D. Del análisis exhaustivo realizado en el centro de la ciudad de Santander sobre el uso de las zonas de C/D se ha obtenido que estas ilegalidades pueden ser de dos tipos: por ser usadas por vehículos no autorizados, como por ejemplo coches, o por exceder el tiempo máximo permitido para realizar las entregas (DT). Con el objetivo de evaluar cuantitativamente las consecuencias de estas ilegalidades se ha llevado a cabo un proceso de análisis exploratorio que ha dado lugar a proponer los siguientes escenarios, en los que la única variable que varía es el grado de las dos ilegalidades mencionadas, permaneciendo constante el resto de variables, como son: la regulación establecida por la autoridad competente, así como el número de DB en cada zona de C/D (Figura 7).

A. situación actual

- B. situación en la que las zonas de C/D son utilizadas únicamente por vehículos autorizados (durante el tiempo que lo hacen actualmente).
- C. situación en la que las zonas de C/D son utilizadas durante el tiempo máximo permitido por la regulación existente (por el mismo tipo de vehículos que lo usan actualmente).
- D. Situación en la que los vehículos de mercancías están estacionados como máximo el tiempo máximo permitido por la regulación existente y los coches estacionan durante un periodo corto de tiempo (distribución normal, $N(2,0.5)$). Se ha tomado este valor ya que está regulado y permitido el realizar paradas, siendo una parada la inmovilización del vehículo durante un tiempo inferior a dos minutos, sin que el conductor pueda abandonarlo en ningún momento(LEY 19/2001).
- E. Situación en la que solo estacionan vehículos de mercancías, pero en este caso como máximo 5 minutos más del tiempo máximo permitido. Por ejemplo, si el tiempo máximo permitido es de 30 minutos, los transportistas que actualmente exceden los 35 minutos, en este escenario estarán estacionados como máximo 35min, y los transportistas que actualmente lo hacen durante un tiempo menor, continuarán igual.
- F. Situación que suma las ilegalidades de la situación D y E. Vehículos de mercancías estacionando hasta 5 minutos más del tiempo permitido y coches estacionando durante un periodo corte de tiempo (distribución normal, $N(2,0.5)$)
- G. Situación en la que se cumple la regulación: uso por vehículos autorizados y durante el tiempo permitido.

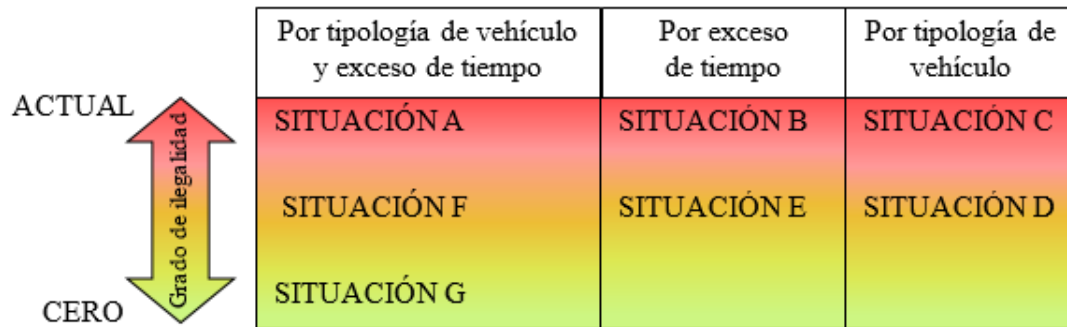


Figura 7. Esquema de los diferentes escenarios analizados en el modelo de análisis de uso de las zonas de C/D

Los escenarios D, E y F tratan de representar aquellas situaciones en las que existe una vigilancia en las zonas de C/D pero la regulación no es totalmente estricta.

Para estos 7 escenarios se determinará cuantitativamente las consecuencias del uso ilegal de las zonas de C/D mediante el estudio de la afección al uso del espacio público. Para ello se simularán los 7 escenarios descritos en un simulador de eventos discretos, Rockwell Arena.

El software Rockwell Arena ha sido usado en otras investigaciones para simular un amplio rango de situaciones, entre ellas, la simulación del tráfico. EL software ofrece un soporte intuitivo de diagramas de flujo para modelar, controla el flujo de tráfico en el sistema (vehículos de mercancía en zonas de C/D), registra estadísticas personalizadas, expresiones definidas por el usuario y dispone de una interfaz con bases de datos externas y hojas de cálculo (Shishvan & Benndorf, 2014). Almaz & Altioik (2012) usaron Arena para desarrollar un modelo de simulación del tráfico de barcas en el río Delaware en Estados Unidos. Investigaron varios escenarios teniendo en cuenta la legislación naval y las características de las diferentes terminales. También se ha usado para investigar el diseñar la red ferroviaria de mercancías, Motraghi & Marinov (2012) investigaron el sistema actual y usaron Arena para el análisis y uso de diferentes alternativas. En el ámbito de la red de tráfico por carretera, se ha utilizado para evaluar y mejorar el flujo de tráfico (Muñuzuri et al., 2013). El control del tráfico es un elemento importante en las ciudades, tanto para peatones como para vehículos. Kamrani et al.

(2014) simularon el tráfico de dos intersecciones con y sin señalización semaforizada en hora punta.

En la simulación de eventos discretos llevada a cabo, los vehículos llegan según una distribución de llegadas (distribución actual) a la zona de C/D donde quieren aparcar para realizar las entregas, esta variable es fija en todos los escenarios. Los vehículos son caracterizados: a) según su tipología (coches, LF, MF o HF), el porcentaje de vehículos de cada tipo varía para los diferentes escenarios, ya que en alguno de ellos el número de coches que acceden a las zonas de C/D es cero; y b) según el tiempo que cada uno de ellos destina a realizar las entregas, y por lo tanto esta estacionado en la zona de C/D, este tiempo varía en los diferentes escenarios, tal y como se ha mencionado anteriormente (para vehículos de mercancías: tiempo actual, límite de 35 o 30 minutos; para coches: tiempo actual o $N(2;0,5)$). Una vez caracterizados los vehículos que tienen espacio para aparcar en las zonas de C/D lo hacen, en caso contrario toman otra decisión (doble fila, sobre las aceras, en zonas restringidas o van a otro lugar).

De los resultados obtenidos de la simulación se obtienen muchas variables, entre ellas el número de vehículos de mercancías que quieren hacer uso de las zonas de carga y descarga durante el período de estudio. Los vehículos de mercancías pueden localizarse o en las propias zonas de C/D o en los carriles contiguos (vehículos en doble fila) o sobre las aceras o en espacios restringidos. Con esto y con el espacio medio que ocupa un vehículo, se estima el espacio que actualmente está siendo usado de manera incorrecta debido a las diferentes ilegalidades producidas en torno las zonas de C/D.

3.2.2. Modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga

Este modelo tiene como objetivo diseñar las zonas de carga y descarga a partir del número de bahías de la zona C/D que optimice el tiempo de operación de los transportistas y evite tiempo de espera excesivos o estacionamientos ilegales, como consecuencia de no disponer de una plaza en el momento que llega a la zona de carga y

descarga. Con esta medida los impactos negativos del transporte de mercancías en el tráfico se pueden ver reducidos.

Este modelo debe aplicarse en una zona que sea suficientemente pequeña para asegurar que todos los receptores finales de la carga (establecimientos, domicilios etc.) estén a una distancia aceptable a pie de la zona de carga/descarga. Hay diferentes estudios sobre cuál es la distancia a pie aceptable: Alho & e Silva (2014) establecían que esta distancia era de 75m, sin embargo Letnik et al. (2018) realizaron un estudio en el que debía ser como máximo de 250 metros, admitiendo que puntualmente algún establecimiento estuviese a una distancia mayor. Por lo tanto, si es necesario aplicar el modelo a una zona que no cumple este requisito, como puede ser el centro urbano de una ciudad, este espacio debe dividirse en subzonas y aplicar el modelo a esas zonas más pequeñas para así asegurar que la distancia a pie es aceptable.

El modelo propuesto consta de dos etapas. En la primera etapa se hace uso de la teoría de colas con el objetivo de obtener de manera rápida una primera estimación del número de bahías de carga/descarga necesarias. Sin embargo, la teoría de colas tiene el inconveniente de que no se aproxima mucha a la realidad, por dos motivos: a) usa el mismo tiempo de entrega para todos los vehículos y (b) solo un tipo de distribución de llegada puede ser aplicada durante la hora de análisis. Por esta razón, la segunda etapa, se utiliza un programa de simulación de eventos discretos (Rockwell Arena) para poder hacer frente a esas limitaciones.

En este modelo, el software Rockwell Arena se ha utilizado para tener en cuenta la estocasticidad que se produce en el uso de las zonas de carga y descarga. Las variables estocásticas que se tienen en cuenta en el modelo son: la distribución de llegadas de los vehículos de mercancías a la zona de estudio durante un período de tiempo, la tipología de vehículos que usan las zonas de C/D y los tiempos de entrega de cada tipo de mercancía a entregar (Figura 8).

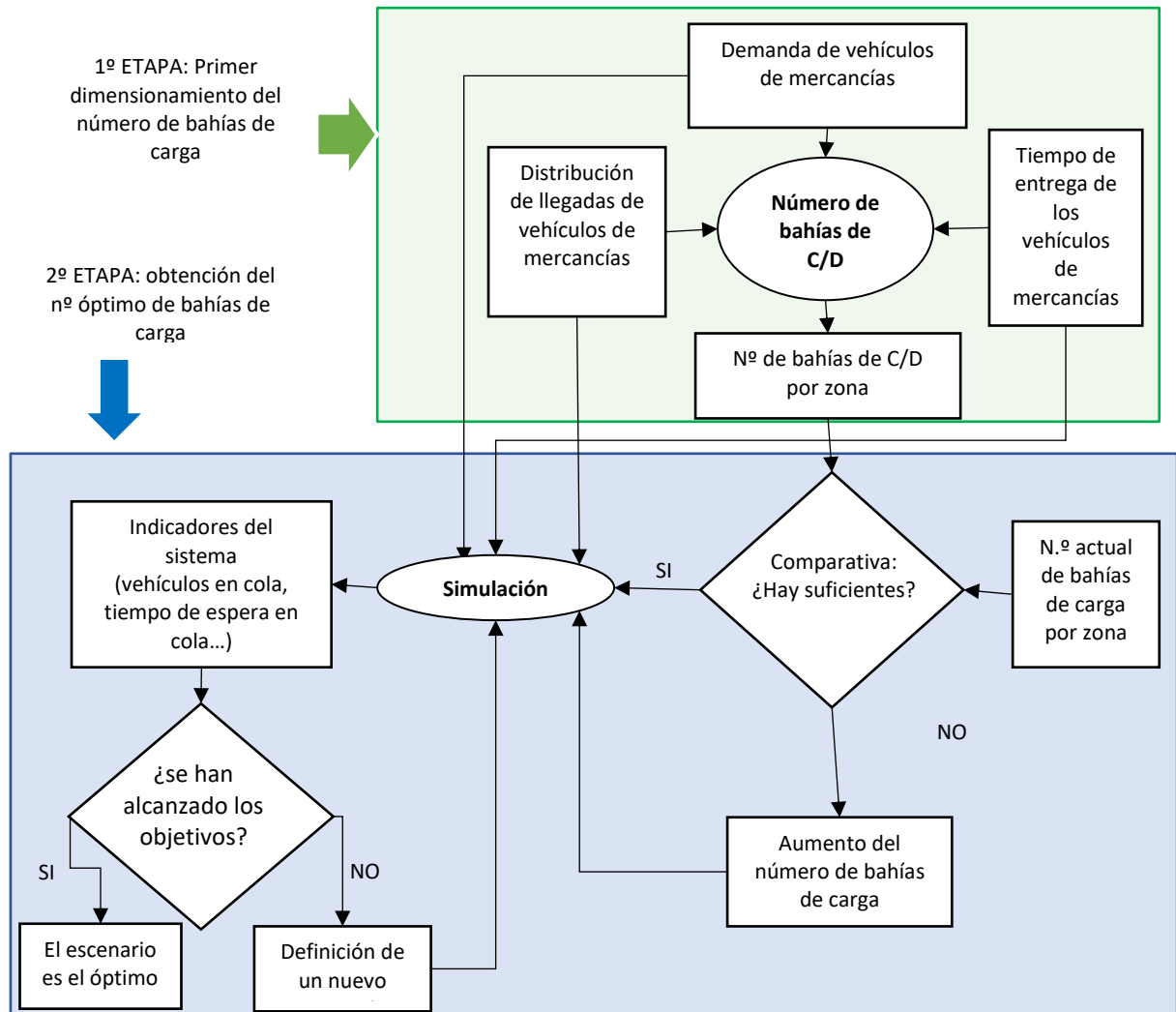


Figura 8. Metodología de optimización de bahías de carga/descarga

Primera etapa: estimación inicial del número de bahías de carga

En la primera etapa, un dimensionamiento inicial del número de zonas de carga y descarga se ha llevado a cabo basándose en la teoría de colas. La teoría de colas es el estudio matemático que analiza la formación de una cola, las cuales se causan cuando la demanda es mayor que la capacidad (Erlang, 1909). Una cola es un sistema con una serie de recursos y una línea de espera, en la que las peticiones de los usuarios esperan a que alguno de los recursos quede disponible para ser atendidos (Sundarapandian, 2009). La teoría de colas ha sido utilizada por otros investigadores en diferentes ámbitos,

entre ellos el transporte y la logística (Masek et al., 2015; Oyatoye et al., 2011; Portilla et al., 2009).

La notación de Kendall y Lee nace con el objetivo de estandarizar la forma en la que se definen los sistemas de colas para así poder analizarlos igual (Kendall, 1953). Los parámetros que describen las características de una cola son:

$$a / b / c (d, e, f)$$

Donde:

- a : indica el tipo de distribución en el proceso de llegada de usuarios, es decir, el tiempo entre una petición de llegada y la siguiente.
- b indica el tipo de la configuración del servicio, es decir, el tiempo desde que un usuario accede a un recurso hasta que finaliza.
- c: representa el número de recursos idénticos trabajando en paralelo: 1,2,...
- d: representa el número máximo de consumidores permitidos en el sistema de colas (tanto si están siendo servidos o están esperando al servicio): (∞ , $n_{\text{máx}}$)
- e: indica la disciplina de la cola, establece el orden en el que se va a atender a los clientes:
 - FIFO: First In –First Out, los usuarios son servidos en orden de llegada.
 - LIFO: Last In – First Out, los usuarios son servidos en el orden contrario de llegada.
 - SIRO: Service In Random Order, los usuarios son servidos en orden aleatorio.
 - HIFO: High In-First Out, el usuario con el mayor valor de un indicado adecuado es servido primero.
- f: indica el número de estados de servicio. Puede haber tantas partes en las que se subdivide el trabajo, cada una con su cola y su dependiente que deben ser completadas sucesivamente. Si el número de estados de servicio es 1, este parámetro se puede omitir.

Las distribuciones de tiempo para las características “a” y “b” suelen seguir alguna de las siguientes funciones de distribución:

- D = variable determinista
- M = variable aleatoria: exponencial negativa
- E = variable aleatoria: Erlang
- G = variable aleatoria: genérica

La teoría de colas es la forma más rápida de obtener una primera aproximación del número óptimo de zonas de C/D. El sistema de colas ofrece diferentes variables que son indicadores de su rendimiento como son:

- Tiempo medio en el sistema: es el tiempo que transcurre desde que un vehículo de mercancías llega a la zona de C/D (o sus alrededores) hasta que la abandona.
- Tiempo medio de estancia en cola: el tiempo desde que un vehículo de mercancías llega a la zona de C/D y espera en doble fila para poder estacionar en dicha zona de C/D.
- Número medio de usuarios en el sistema: número medio de vehículos de mercancías en la zona de C/D y sus alrededores, ya sea en la propia zona aparcado, o en cola esperando a aparcar, o aparcado ilegalmente (doble fila, sobre las aceras o en zonas de aparcamiento restringido).
- Número medio de usuarios en cola: número medio de vehículos de mercancías esperando en doble fila junta a la zona de C/D para estacionar en la misma.

En este modelo de optimización, la teoría de colas solo se aplica en la hora punta y para ello utiliza un modelo de colas M/G/c/ ∞ /FIFO. En otras palabras, la distribución de llegadas a las zonas de C/D sigue una distribución exponencial y el tiempo de entrega de la mercancía (configuración del servicio) sigue una distribución normal. El número de servicios en este caso es el número de bahías de carga, que se obtendrá aplicando la teoría de colas (DB_{QT} , número de bahías de carga usando la teoría de colas).

El objetivo de esta etapa es obtener una primera estimación del número de bahías de carga necesarias. Los resultados alcanzados usando la teoría de colas se comparan con

el número de bahías de carga existentes en la zona de estudio con el objetivo de identificar si existen o no el número suficiente de bahías de carga y descarga.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la teoría de colas tiene limitaciones. Por esta razón, en la segunda etapa, se aplica un modelo de simulación para obtener el número óptimo de bahías de carga de manera más realista.

Segunda etapa: obtención del número óptimo de bahías de carga

En esta segunda etapa se obtiene el número óptimo de bahías de carga (DB) realizando una simulación más próxima a la realidad. Para alcanzar este objetivo, se ha desarrollado un modelo en el simulador de eventos discretos Rockwell Arena. En el apéndice 1 se muestra un esquema llevado a cabo en esta segunda etapa en Rockwell Arena.

La variedad del proceso y la aleatoriedad se determina mediante las variables estocásticas, las cuales han sido desagregadas y aplicadas. Las variables estocásticas utilizadas son la llegada de vehículos, lo que permite una evaluación a lo largo del tiempo, y el tiempo de parada para realizar las actividades de C/D, que cambia dependiendo del tipo de vehículo de mercancía.

Los resultados obtenidos en la primera etapa (DB_{QT}) se comparan con el número actual de bahías de carga y descarga en el área de estudio (DB_C , número actual de bahías de carga):

- Si $DB_{QT} > DB_C$, la simulación de eventos discretos comienza con un escenario en el que el número de bahías de carga es igual a DB_{QT} .
- En caso contrario, $DB_{QT} < DB_C$, la simulación comienza con un escenario en el que el número de bahías es igual a DB_C .

Por lo tanto, un dato de entrada es el número de bahías de carga. Otros datos necesarios para el escenario de simulación son la distribución de llegada de vehículos, el tipo de bienes que se distribuyen y el tiempo de entrega para cada tipo de bien.

La simulación de eventos discretos sigue el diagrama que se presenta en la Figura 9. Los vehículos que están entre los límites de peso permitidos (v) llegan a cada zona de estudio siguiendo una distribución de llegadas definida previamente. Estos vehículos se caracterizan por el tipo de mercancía que transportan y por lo tanto su tiempo de carga/descarga. Si la zona de carga/descarga tiene una bahía disponible, los vehículos aparcan y realizan sus entregas. Si no hay ninguna bahía libre pero el tiempo de espera es muy bajo, los vehículos esperan a que la bahía quede libre. Si no, los vehículos no aparcan en las zonas de carga/descarga sino que aparcan en doble fila, sobre las aceras, en zonas de aparcamiento para coches, o se van a otra zona de carga/descarga o eligen otra opción.

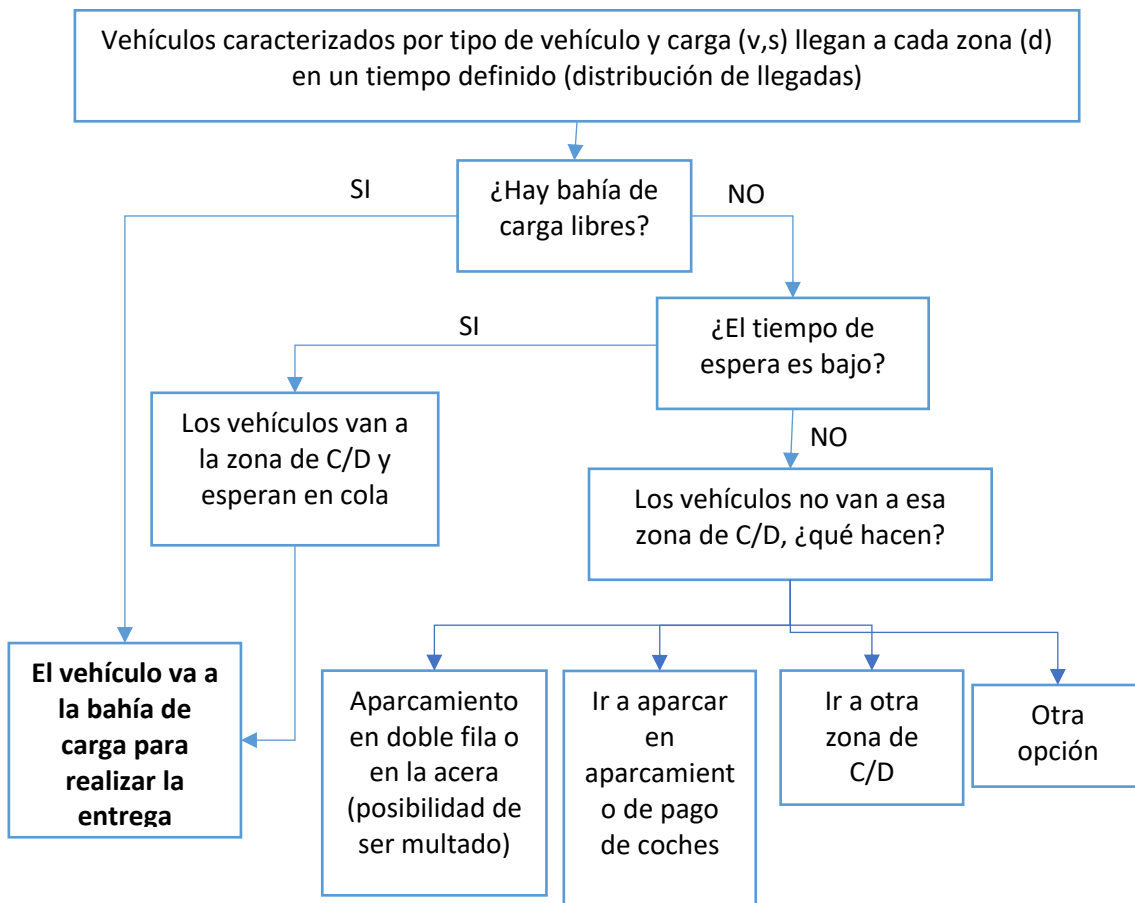


Figura 9. Diagrama de simulación de eventos discretos

Los resultados de la simulación proporcionan un número de indicadores que cambian a lo largo de la simulación como son: el número de vehículos en cola, el tiempo de espera en la cola, el número de vehículos que van a las zonas de carga/descarga, el número de

vehículos que optan por no ir a las zonas de carga/descarga debido a los excesivos tiempos de espera etc. Estos indicadores verifican si los objetivos deseados se alcanzan en el escenario simulado. Si es que si, el escenario óptimo se ha alcanzado. En caso contrario, el número de bahías de carga habrá que aumentarlo o disminuirlo, hasta obtener el escenario en el que se optimice el número de bahías de carga y descarga.

3.2.3. Modelo de uso compartido de paradas de autobús urbano

El objetivo de este modelo es optimizar el uso de los diferentes espacios reservados para el transporte como son las zonas de carga/descarga destinadas para que los vehículos de mercancías realicen sus operaciones; y las paradas de autobús reservadas para que el autobús se detenga y los usuarios puedan subir y bajar.

Las paradas de autobús están distribuidas por la ciudad y han sido diseñadas para que al menos un autobús pueda realizar una parada. El diseño de las paradas de autobús y de su ubicación óptima ha sido ampliamente estudiada (Cheng et al., 2019; Moura et al., 2012). Uno de los mayores problemas de las paradas de autobús es la concentración de autobuses, es decir, que los autobuses lleguen a las paradas a la vez dando lugar a tiempos de paradas mayores y un uso ineficiente de las mismas (Schmöcker et al., 2016; Sirmatel & Geroliminis, 2018). Es por ello que, numerosos investigadores han tratado de dar solución a este problema (Daganzo & Pilachowski, 2011; Muñoz et al., 2013; Sirmatel & Geroliminis, 2018). Sin embargo, el modelo propuesto en este capítulo propone una solución para las situaciones opuestas, es decir, aquellas paradas de autobús que tienen una frecuencia de paso muy bajas por lo que la parada es usada durante poco tiempo.

El objetivo principal de este modelo es diseñar, analizar y evaluar el uso compartido de las paradas de autobús. Se propone para ello crear lo que hemos definido como paradas de autobús de uso compartido. Estas paradas pueden ser utilizadas por dos tipologías de vehículos: autobuses y vehículos de mercancías. Los autobuses disponen de un uso preferente, pero cuando este espacio no está ocupado por autobuses, pueden ser

usados por vehículos de mercancías hasta que llegue el próximo autobús urbano. De esta manera las paradas de autobús pueden ser utilizadas durante más tiempo.

Como consecuencia de la aplicación de este modelo la oferta de espacios destinados a vehículos de mercancías aumenta, y se puede disminuir, si se quiere, el número de bahías de c/d (DB) de uso exclusivo para destinarlo a otros fines como puede ser uso para aparcamiento de coches, motos o bicicletas, ubicación de mobiliario urbano como contenedores o bancos, para aumentar el espacio de aceras u otros fines.

Esta propuesta plantea que las paradas de autobús puedan ser utilizadas por más de una tipología de vehículos, que podrán ser o autobuses (B), o vehículos de mercancías (FV) que actualmente usan las zonas de carga y descarga (LZ). En definitiva, se analiza el uso compartido de las paradas de autobuses (BS) que se encuentran en una zona (d) a la que los vehículos de mercancías van para carga o descargar bienes (Figura 10). La notación que se ha usado es la siguiente:

- LZ_d = Zona de C/D ubicada en la zona d
- $BS_{i,d}$ = es la parada de autobús candidata a ser de uso compartido i, la cual está ubicada en la zona d
- $FV_{j,d}$ = es un vehículo de mercancías j que va a realizar sus operaciones a la zona d.
- $B_{k,d}$ = es un autobús k que para en una parada de autobús localizada en la zona d

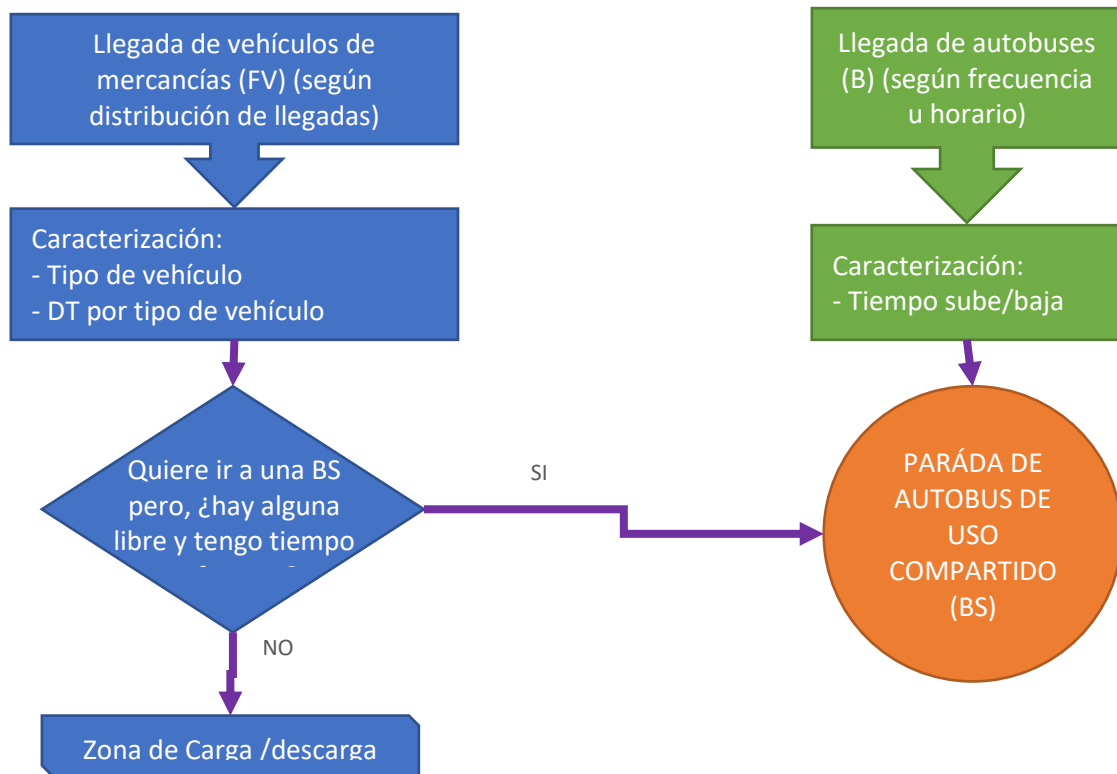


Figura 10. Diagrama de uso de las paradas de autobús de uso compartido

Para que una parada de autobús sea candidata a ser compartida tiene que cumplir los siguientes requisitos:

- Paradas localizadas en zonas en las que el espacio público escasea como es el caso de las zonas con problemas de aparcamiento (tanto de vehículos privados como de mercancías).
- Frecuencia de paso de autobús baja, entendiendo por baja que al menos durante el 50% del período de análisis el intervalo de paso es mayor o igual al tiempo medio de operación de carga y descarga.
- Parada segregada del tráfico general

Para el desarrollo del modelo es necesario tener en cuenta algunas hipótesis: (1) las paradas de autobús candidatas a ser de uso compartido están bien diseñadas en cuanto a longitud, localización, etc. por lo que no tienen ningún problema en cuanto a lo que el diseño de parada de autobús implica. (2) Las líneas de autobús también están bien diseñadas en cuanto a frecuencia y horarios. Además, (3) se asumen que no hay vehículos aparcados ilegalmente en las paradas de autobús. Finalmente, para que este

modelo funcione, (4) el uso de las paradas de autobús compartidas tiene que estar estrictamente controladas.

Para alcanzar ese control estricto existen diferentes sistemas de vigilancia como sistemas de reconocimiento de vehículos o de matrículas (Hu & Ni, 2018). Este tipo de sistemas de vigilancia se usan, por ejemplo, en las líneas de autobuses con el objetivo de reconocer automáticamente las matrículas de los vehículos que circulan por las líneas de autobús reservadas (Fernández-López et al., 2013). Un sistema parecido puede ser usado para la vigilancia de las paradas de autobús de uso compartido. Por otro lado, las paradas de autobús informan en paneles de mensajería variable el tiempo de espera para cada línea de autobús. Este panel también puede usarse para informar a los conductores de vehículos de mercancías sobre el

El análisis del uso mixto de las paradas de autobús tiene como objetivo maximizar el uso de paradas de autobús ubicadas en las diferentes zonas de estudio (BSU_d) (eq.1), ya que tal y como se ha mencionado anteriormente se puede aumentar su uso actual. Se calculará, para cada zona d , el uso de cada parada candidata a ser compartida ($BSU_{i,d}$) como la suma del uso de la parada i por autobuses ($BU_{i,d}$) y por los vehículos de mercancías ($FVU_{i,d}$) (eq. 2). El uso de las paradas de uso compartido se mide en unidades de tiempo.

$$BSU_d = \sum BSU_{i,d} = \sum (BU_{i,d} + FVU_{i,d}) \quad \forall i,d \quad (1)$$

El uso de las paradas de autobús por autobuses no variara con respecto a la situación actual, siempre que no se modifique la frecuencia de paso de las líneas. Su uso se ha definido como se muestra en la ecuación 3.

$$BU_{i,d} = \sum [(T_{k,i,d} \cdot f_{i,d}) \pm e] \cdot T \quad \forall k,d \quad (2)$$

Donde:

- $T_{k,i}$ = tiempo que el autobús k ocupa la parada de autobús de uso compartido i ubicada en la zona d para que suban/bajen usuarios.
- f_i = frecuencia de paso de los autobuses que pasan por la parada de autobús de uso compartido i ubicada en la zona d .

- T = Período de tiempo que se está analizando el uso de la parada.
- e = error en el tiempo de llegada del autobús.

La capacidad de parada de bus candidata a ser de uso compartido (NBS_i) se define como el número máximo de vehículos de mercancías que pueden usar las BS_i simultáneamente.

$$NBS_i = \frac{L_{BS_i}}{L_{FV}} \quad \forall i \quad (3)$$

Dónde:

L_{BS_i} = longitud de la parada de bus i candidata a ser de uso compartido

L_{FV} = longitud media de los vehículos de mercancía

Por otro lado, la parada de autobús de uso compartido será también usada por vehículos de mercancías ($FVU_{i,d}$). Los vehículos de mercancías usaran la parada de autobús i ubicada en la zona d durante el tiempo que el vehículo de mercancías j necesita para realizar sus operaciones ($DT_{j,i,d}$), siempre y cuando dispongan de espacio y tiempo suficiente para ello ($\delta_{i,d}$):

$$FVU_{i,d} = \sum DT_{j,i,d} \cdot \delta_i \quad \forall i, \forall j, \forall d \quad (4)$$

$$\delta_{i,d} = \begin{cases} 1 & \text{si} \begin{cases} ET_{i,d}^t \geq DT_{j,d} + ST \\ x_k^t \neq x_{i,d} \\ Occ_{i,d}^t \leq NBS_{i,d} - 1 \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall t \quad (5)$$

$$Occ_{i,d}^t = \sum_{j=0}^n Occ_{i,j,d}^t = \begin{cases} 1 & \text{si} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad x_{j,d}^t = x_{i,d} \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall t \quad (6)$$

Donde:

- $\delta_{i,d}$ = es una variable dummy que vale 1 si el vehículo de mercancías con destino d dispone de espacio y tiempo suficiente para realizar sus operaciones en la parada de bus i .

- $ET_{i,d}^t$ = expected arrival time en el instante t en la parada de autobús i ubicada en la zona d.
- ST = safety time, margen de tiempo de seguridad por si existen errores de precisión en el tiempo de espera o el vehículo de mercancías excede el tiempo permitido.
- $Occ_{i,j,d}^t$ = es la ocupación de la parada de autobús i ubicada en la zona d, por el vehículo de mercancías j en el instante t
- $Occ_{i,d}^t$ = es la ocupación de la parada de autobús i ubicada en la zona d en el instante t
- $x_{i,d}$ = posición de la parada de autobús i ubicada en la zona d
- $x_{j,d}^t$ = posición de el vehículo de mercancías j con destino la zona d en el instante t.
- x_k^t = posición del autobús k en el instante t

La aplicación de este modelo se ha llevado a cabo mediante el programa de simulación de eventos discretos Rockwell Arena.

Una vez que maximizamos el uso de las paradas de autobús de uso compartido, otra cuestión que queda por definir es cuál es el número óptimo de bahías de C/D en esa zona, ya que un porcentaje de transportistas ya no hace uso de las zonas de C/D, sino que realiza sus operaciones en las paradas de bus de uso compartido. Para ello se aplicará el modelo de optimización de bahías de carga y descarga descrito anteriormente.

3.3. Modelo de optimización de vehículos de mercancía de gran dimensión

Los vehículos de mercancía de gran dimensión suelen estar prohibidos en los centros de las ciudades, sin embargo, en determinadas circunstancias es necesario que estos

vehículos circulen por la ciudad. Uno de los objetivos de esta tesis doctoral es minimizar el impacto de este tipo de transportes, que, aunque no sean muy habituales cuando es necesaria su presencia el impacto es significativo. Para ello se presenta un modelo para optimizar la planificación y gestión de estos transportes. El modelo determina la distribución de viajes, definiendo la capacidad y el tamaño de la flota. Estos viajes se realizarán a través de diferentes rutas, minimizando los costes económicos, sociales y ambientales.

El modelo de optimización se basa en la aplicación de un programa matemático bi-nivel (Figura 11) para encontrar las mejores alternativas desde el punto de vista económico, social y ambiental. Los camiones de gran dimensión interactúan con el resto de modos de transporte que se mueven en las ciudades, como son los coches, los autobuses y los vehículos de mercancías de menor tamaño. Para poder analizar dicha interacción en el modelo de optimización es necesario hacer uso de un software de modelización y simulación de transporte que permita representar el flujo de tráfico de manera continua, como es el software PTV-VISUM.

El modelo bi-nivel considera en el nivel inferior la interacción con el resto de medios de transporte, obteniendo flujo de vehículos, tiempos de acceso, de espera, de viaje etc. obtenidos del modelo de la ciudad. Esta información es utilizada en el nivel superior para minimizar los costes totales del sistema, es decir, los costes sociales compuestos por los costes de los usuarios de autobuses y coches, los costes de operación de los coches, autobuses y vehículos de mercancías, así como los costes medioambientales de todos los vehículos (Ec.1).

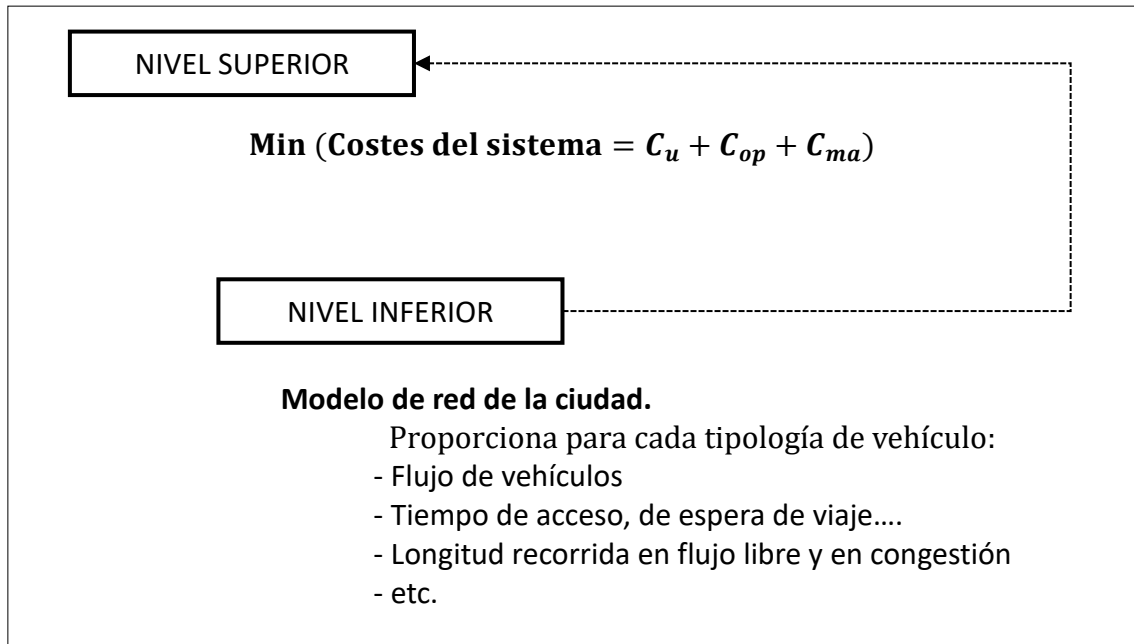


Figura 11. Metodología bi-nivel de optimización de vehículos pesados.

$$\text{Min (Costes del Sistema)} = \text{Min } (C_{uT} + C_{opT} + C_{maT}) \quad (7)$$

$$C_{uT} = C_{uC} + C_{uB} \quad (8)$$

$$C_{uC} = \varphi_{\text{viaje, C}} \cdot T_{\text{viaje, C}} \quad (9)$$

$$C_{uB} = \varphi_{\text{acc, B}} \cdot T_{\text{acc, B}} + \varphi_{\text{egr, B}} \cdot T_{\text{egr, B}} + \varphi_{\text{esp, B}} \cdot T_{\text{esp, B}} + \varphi_{\text{viaje, B}} \cdot T_{\text{viaje, B}} + \varphi_{\text{trans, B}} \cdot T_{\text{trans, B}} \quad (10)$$

Donde:

C_{uT} : Coste total de los usuarios

C_{uC} : Coste de los usuarios de coche

C_{uB} : Coste de los usuarios de autobús

$T_{\text{viaje, C}}$: tiempo de viaje en coche; $\varphi_{\text{viaje, C}}$: valor del tiempo del viaje en coche

$T_{\text{acc, B}}$: tiempo de acceso al autobús; $\varphi_{\text{acc, B}}$: valor del tiempo del acceso al autobús

$T_{\text{egr, B}}$: tiempo de salida del autobús; $\varphi_{\text{egr, B}}$: valor del tiempo de salida del autobús

$T_{\text{esp, B}}$: tiempo de espera al autobús; $\varphi_{\text{esp, B}}$: valor de tiempo de espera al autobús

$T_{\text{viaje, B}}$: tiempo de viaje en autobús; $\varphi_{\text{viaje, B}}$: valor del tiempo en viaje en autobús

$T_{trans,B}$: tiempo de transbordo de autobús ; $\varphi_{trans,B}$: valor del tiempo de transbordo de autobús

Los costes de operación han sido calculados usando la siguiente formula:

$$Cop_T = Cop_B + Cop_{Cam} \quad (11)$$

Donde:

Cop_T : Costes operativos totales

Cop_B : Costes operativos del autobus

Cop_{Cam} : Costes operativos del camión

Los costes operativos del autobús (Cop_B) están compuestos por tres factores: los costes proporcionales a la distancia recorrida (CR), costes de personal (CP) y costes fijos (CF), tal y como se expresa en la siguiente formula.

$$Cop_B = CR + CP + CF \quad (12)$$

$$CR = \varphi_{CR} \cdot (\sum_i L_i \cdot f_i) \quad (13)$$

$$CP = \varphi_{CP} \cdot \text{Horas de personal} \quad (14)$$

$$CF = \varphi_{CF} \cdot n^{\circ} \text{ de autobuses} \quad (15)$$

Donde:

φ_{CR} : Coste unitario por km. recorrido por el autobus

φ_{CP} : coste horario de personal

φ_{CF} : costes fijos por hora de un autobús

L_i = longitud de la ruta i

f_i = frecuencia de la ruta i

Los costes operativos de camiones (Cop_{Cam}) se estiman como:

$$Cop_{Cam} = \sum_i T_i \cdot u_i \cdot C_u \quad (4)$$

$$T = T_{ida} + T_{regreso} + T_{carga} + T_{descarga} \quad (17)$$

Donde:

T_{ida} : tiempo de ida al punto de carga/descarga

$T_{regreso}$: tiempo de regreso al punto de carga/descarga

T_{carga} : tiempo de carga

T_{descarga} : tiempo de descarga

u_i : índice de uso del camión.

C_u : coste horario por el uso del camión

Los costes medioambientales totales (C_{ma_T}) se han calculado para las diferentes alternativas teniendo en cuenta 5 tipos de contaminantes (p): NOx, NMVOC, CH4, PM2.5 and CO2, y teniendo en cuenta las diferentes tipologías de vehículos (v): coches de gasolina, coches diesel, autobuses y camiones de 3 tipos de tonelajes (pesados, medios y ligeros).

$$C_{ma_T} = \sum_p Q_p \cdot C_p \quad (5)$$

$$Q_p = \sum_v (km. \text{cong}_v \cdot \text{consum. cong}_v + km. \text{fluido}_v \cdot \text{consum. fluido}_v) \cdot \delta_v \cdot \text{Emisiones}_{p,v} \quad (19)$$

Donde:

Q_p : cantidad de contaminante p.

C_p : costes medioambientales del contaminante p. (€/ton. De contaminante).

$Km. \text{cong}_v$: km recorridos con la red congestionada por el tipo de vehículo v.

$Km. \text{fluido}_v$: = km recorridos con la red sin congestión por el tipo de vehículo v.

Consum. cong_v : consumo del vehículo tipo v con la red congestionada.

Consum. fluido_v = consumo del vehículo tipo v con la red sin congestión.

δ_v = factor de conversión kg/ litros de fuel para el tipo de vehículo v.

$\text{Emisiones}_{p,v}$ =emisiones de contaminantes tipo p para la tipología de vehículo v.

En primer lugar se obtiene el consumo de combustible de cada alternativa, y conocido el consumo se calcula la emisión de contaminantes de cada una de ellas (Tabla 3). La emisión de contaminantes depende del grado de congestión de la red, de la distancia recorrida así como de la tipología de vehículo. La congestión de una red está determinada por la relación entre la intensidad y la capacidad de la vía. Finalmente se transforma a unidades monetarias (Tabla 4).

	Emisiones (g. de contaminante/Kg de combustible)					Consumo (l./Km)		δ (Kg/l.)
	NOx	NMVOC	CH4	PM	CO2	Con congestión	Sin congestión	
Coches gasolina	10.89	13.44	1.19	0.03	3180.00	0.08	0.06	0.680
Coches diésel	11.12	0.61	0.07	0.80	3140.00	0.07	0.05	0.850
Autobuses	32.67	0.99	0.24	0.81	3140.00	0.34	0.26	0.850
Camiones pesados						0.34	0.26	
Camiones medios	34.84	3.06	0.38	1.34	3140.00	0.31	0.22	0.850
Camiones ligeros						0.29	0.21	

Tabla 3. Índice de consumo de los vehículos (litros/km) e índice de emisiones de los vehículos (g de contaminante/kg de combustible).

	NOx	NMVOC	CH4	PM	CO2
€/ton. De contaminante	3.60	800.00	775.00	114.00	29.00

Tabla 4. Costes ambientales de cada tipo de contaminante (€/ton.)

Este modelo optimiza la planificación y gestión de vehículos especiales de mercancías en las ciudades, los cuales se desplazan desde fuera de las ciudades hasta un punto específico del centro urbano. El objetivo es minimizar su impacto para que en aquellas ocasiones en las que haya grandes cantidades de mercancía su impacto sobre la ciudad sea el mínimo desde el punto de vista social, económico y/o ambiental.

Capítulo 4

Descripción del caso de estudio

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta el caso de estudio sobre la que se van a aplicar los modelos y metodología descritas anteriormente, la ciudad de Santander. El departamento en el que la doctoranda ha realizado su investigación (Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la Universidad de Cantabria) ha desarrollado numerosas investigaciones que han sido aplicadas a esta ciudad. Esto ha permitido disponer de información, datos y modelos de simulación de transporte de la ciudad que han sido de gran ayuda en el desarrollo de esta investigación. Además, Santander es una ciudad media representativa de España, por lo que estos modelos pueden transferirse a otras ciudades de tamaño medio.

En primer lugar, se explican las principales características geográficas de la ciudad de Santander para tener una visión general de la ciudad donde se van a aplicar los modelos. Posteriormente se expone el proceso de recopilación de información. Tal y como se ha mencionado anteriormente, las bases de datos provenientes de diferentes investigaciones y proyectos llevados a cabo en el departamento en el que la doctoranda ha realizado su investigación han aportado una gran fuente de información. Además, se describe el proceso de toma de datos llevado a cabo a través de encuestas y grabaciones de video con el objetivo de complementar dicha información y obtener información adicional. Por último, se presenta la información recopilada, la cual ha sido analizada y explotada para así poder ser utilizada posteriormente para la especificación, calibración y validación de los modelos planteados.

4.2. Características de la ciudad de Santander

Santander es una ciudad de tamaño medio ubicada al norte de España, para ser más concretos en la costa del mar cantábrico (Figura12). Santander es la capital de la comunidad autónoma de Cantabria y cuenta con unos 172.000 habitantes en una extensión de 36 km².



Figura12. Ubicación de la ciudad de Santander

La ciudad limita al norte con el mar cantábrico, al este con la bahía de la ciudad por lo que esta configuración geográfica hace que las entradas de la ciudad se sitúen en el sur y oeste. La ciudad se caracteriza por su peculiar relieve, ya que cuenta con una serie de lomas (su cota máxima es de 139 metros sobre el nivel del mar) y vaguadas en dirección este-oeste, lo que hace que las principales vías de comunicación sean longitudinales en la misma dirección que la orografía, existiendo limitadas conexiones transversales para vehículos de mercancías. En la siguiente figura (Figura 13) se presenta la ciudad de Santander con sus distritos y secciones censales.



Figura 13. Santander y sus distritos y secciones censales.

El centro urbano de la ciudad tiene una extensión de 0,922 km². En la siguiente figura (Figura 14) se muestra con más detalle las 29 secciones censales del centro de la ciudad.

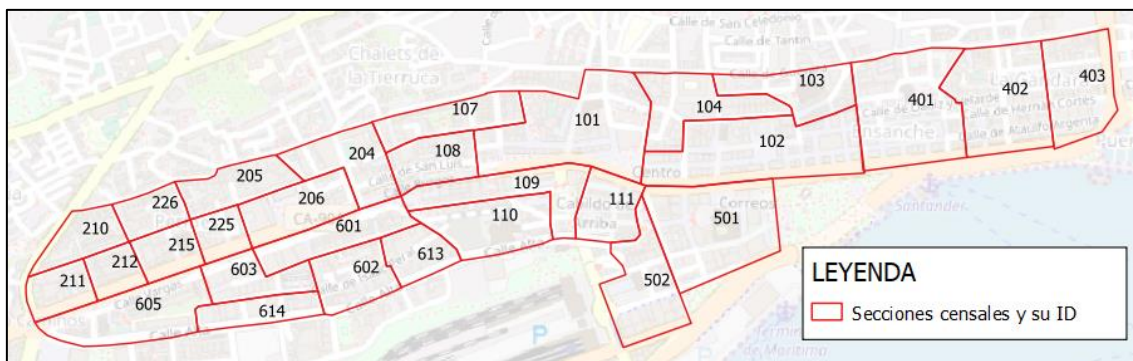


Figura 14. Las 29 secciones censales del centro de Santander

Las infraestructuras de transporte disponibles para entrar por carretera en la ciudad son: al norte de la ciudad la autovía S-20, al sur se encuentra la S-10, la entrada donde se concentra el tráfico portuario y por último la S-30, la ronda de la bahía. Otra forma de acceder a la ciudad es mediante la red ferroviaria, situándose la estación de tren en el centro de la ciudad, junto a la estación de autobuses. El centro de Santander se caracteriza por calles estrechas y en ocasiones de una única dirección, a excepción de la calle principal. Esto tiene como consecuencia que la circulación sea relativamente lenta. Además, como la mayoría de los centros de las ciudades, el estacionamiento sufre diversos problemas, los cuales han sido estudiados por Antolín et al. (2018).

Las infraestructuras de transporte han sido definidas con detalle en el modelo de simulación de transportes de Santander. Todo el sistema de transporte que articula la ciudad ha sido codificado, tanto el de transporte público, como el de privado. Para el caso de transporte público es necesario codificar todas las paradas de autobús en su ubicación e introducir los horarios y frecuencias de todas las expediciones y el recorrido de cada una de las líneas de la red. Para el caso del transporte de mercancías, las zonas de carga y descarga no se han codificado ya que son zonas externas de la red vial. En la siguiente figura (Figura 15) se muestra una visión global de la red del modelo de macro simulación:



Figura 15. Red de infraestructuras del modelo macroscópico de transporte de Santander

Una vez definida toda la infraestructura de los viales y el transporte público en el modelo de simulación, se realiza la zonificación del modelo. Esta zonificación se corresponde con las secciones y distritos censales mencionados anteriormente (Figura 13).

4.3. Recolección de información

Los datos necesarios para las etapas de especificación, calibración y validación de los diferentes modelos se han obtenido de diversas y variadas fuentes de información. Entre ellas se encuentran las bases de datos provenientes de diferentes investigaciones

y proyectos llevados a cabo en el departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la Universidad de Cantabria. Entre las investigaciones llevadas a cabo en el departamento sobre transporte de mercancías en ámbito urbano se encuentra el proyecto REPLICA, Red española de plataformas logísticas intermodales para la mejora de la competitividad y la sostenibilidad ambiental del transporte de mercancías (Robusté et al., 2011), así como otros estudios que incluían la calibración de modelos de demanda de transporte urbano, tanto de viajeros como de mercancías los cuales han sido aplicados sobre la ciudad de Santander (Ibeas et al., 2012; Nuzzolo et al., 2016). Otras estudios llevados a cabo en el departamento investigan las características del transporte de mercancías en diferentes ciudades, entre ellas la ciudad de Santander (Nuzzolo et al., 2016) o la optimización de rutas de transporte de mercancía (Romero et al., 2014). Por otro lado, se han realizado múltiples trabajos en relación a la movilidad global de la ciudad (Tabla 5), lo cual ha proporcionado una modelización muy precisa sobre los diferentes modos de transporte que circulan por la ciudad (transporte público y privado).

Título	Entidad financiadora	Año
INTERBUS - Mejora del servicio de redes de autobuses y fomento de la intermodalidad	Ministerio de fomento	2006
INTERLAND- interacción entre usos del suelo y nuevos modos de transporte sostenibles	Ministerio de fomento	2009
Análisis socio-medioambiental de la distribución de mercancías por carretera (tra2009-14759-c02-02)	Ministerio de economía y competitividad	2010
Modelos de optimización operacional en sistemas de transporte público individual en ámbito urbano (TRA2012-39466-C02-02)	Ministerio de ciencia, innovación y universidades	2013
Modelo avanzado de interacción entre usos del suelo y sistemas de transporte (TRA2012-37659)	Ministerio de ciencia, innovación y universidades	2013
Modelización y control de la calidad percibida y ofrecida en tiempo real como instrumento para incentivar el uso del transporte público de viajeros (TRA2015-69903-R)	Ministerio de ciencia, innovación y universidades	2016

Tabla 5. Proyectos en los que se ha desarrollado el modelo de transporte de Santander.

Además de la información recogida en estos estudios, se han realizado de forma específica para esta tesis doctoral encuestas y grabaciones de video en varias zonas de carga y descarga del centro de la ciudad. El objetivo de estas encuestas y grabaciones es comprobar, actualizar y validar los modelos y estudios previos sobre transporte de mercancías, así como ampliar la información ya disponible, como la información sobre el uso de las zonas de carga y descarga y el comportamiento de los transportistas a la hora de estacionar sus vehículos para realizar operaciones de carga/descarga.

Encuestas en zonas de carga y descarga

Por un lado, se han realizado 652 encuestas durante un día laborable entre las 7:00h. y las 14:00h. en 13 zonas de carga/descarga de la ciudad de Santander. En Figura 16 se muestra la encuesta, se trata de encuestas de preferencias reveladas en las que se pueden diferenciar 3 partes:

- Una primera parte en la que se realiza una caracterización del transporte urbano de mercancías. El objetivo es obtener información para actualizar y validar los modelos desarrollados por Ibeas et al. (2012).
- Otra en la que el transportista ofrece información de la situación de aparcamiento que ha vivido en el momento de la encuesta.
- Por último, una pregunta que solo se realizará a aquellos encuestados que en la que la respuesta a la anterior pregunta sea: la zona de C/D estaba libre. En este caso, se pregunta lo que ha hecho en aquellas situaciones del pasado en las que se ha encontrado la zona de C/D llena.

ENCUESTA A TRANSPORTISTAS		UC UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	GIST																	
HORA LLEGADA:	TIPO DE VEHÍCULO: DE CARGA/DESCARGA CON DESTINO: <ul style="list-style-type: none"> • COMERCIO <input type="checkbox"/> * • DOMICILIO <input type="checkbox"/> DE SERVICIO (fontanero, carpintero...) CON DESTINO: <ul style="list-style-type: none"> • COMERCIO <input type="checkbox"/> • DOMICILIO <input type="checkbox"/> 																			
HORA SALIDA:																				
TIPOLOGÍA DE VEHICULO: MENOR DE 1,8 TONS DE MMA <input type="checkbox"/> LF <input type="checkbox"/> MF <input type="checkbox"/> HF <input type="checkbox"/> MAYOR DE 8 TONS. DE MMA <input type="checkbox"/>																				
TIPOLOGÍA DE SERVICIO POR CUENTA PROPIA <input type="checkbox"/> POR CUENTA AJENA <input type="checkbox"/>																				
TIPOLOGÍA DE MERCANCÍA <table border="0"> <tr> <td>PRODUCTOS ALIMENTARIOS <input type="checkbox"/></td> <td>INDUSTRIA TEXTIL <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>ACCESORIOS PARA EL HOGAR <input type="checkbox"/></td> <td>HIGIENE PERSONAL E HIGIENE DEL HOGAR <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>ARTÍCULOS DE PAPELERÍA <input type="checkbox"/></td> <td>METARIALES DE CONSTRUCCIÓN <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td colspan="2">OTROS TIPO DE MERCANCÍA:.....</td> </tr> </table>				PRODUCTOS ALIMENTARIOS <input type="checkbox"/>	INDUSTRIA TEXTIL <input type="checkbox"/>	ACCESORIOS PARA EL HOGAR <input type="checkbox"/>	HIGIENE PERSONAL E HIGIENE DEL HOGAR <input type="checkbox"/>	ARTÍCULOS DE PAPELERÍA <input type="checkbox"/>	METARIALES DE CONSTRUCCIÓN <input type="checkbox"/>	OTROS TIPO DE MERCANCÍA:.....										
PRODUCTOS ALIMENTARIOS <input type="checkbox"/>	INDUSTRIA TEXTIL <input type="checkbox"/>																			
ACCESORIOS PARA EL HOGAR <input type="checkbox"/>	HIGIENE PERSONAL E HIGIENE DEL HOGAR <input type="checkbox"/>																			
ARTÍCULOS DE PAPELERÍA <input type="checkbox"/>	METARIALES DE CONSTRUCCIÓN <input type="checkbox"/>																			
OTROS TIPO DE MERCANCÍA:.....																				
TIPOLOGÍA DE COMERCIO DE DESTINO — SOLO EN EL CASO DE TIPO DE MERCANCÍA: PRODUCTOS ALIMENTICIOS TIENDAS/SUPERMERCADOS <input type="checkbox"/> RESTAURANTES <input type="checkbox"/> BARES <input type="checkbox"/> OTROS <input type="checkbox"/>																				
NUMERO DE COMERCIOS A LOS QUE VA A SERVIR: <table border="0"> <tr> <td>CANTIDAD TRANSPORTADA A CADA COMERCIO:</td> <td>DISTANCIA DESDE ZONA C/D A COMERCIO:</td> </tr> <tr> <td>1º Comercio:.....</td> <td>1º Comercio:.....</td> </tr> <tr> <td>2º Comercio:.....</td> <td>2º Comercio:.....</td> </tr> <tr> <td>3º Comercio:.....</td> <td>3º Comercio:.....</td> </tr> </table>				CANTIDAD TRANSPORTADA A CADA COMERCIO:	DISTANCIA DESDE ZONA C/D A COMERCIO:	1º Comercio:.....	1º Comercio:.....	2º Comercio:.....	2º Comercio:.....	3º Comercio:.....	3º Comercio:.....									
CANTIDAD TRANSPORTADA A CADA COMERCIO:	DISTANCIA DESDE ZONA C/D A COMERCIO:																			
1º Comercio:.....	1º Comercio:.....																			
2º Comercio:.....	2º Comercio:.....																			
3º Comercio:.....	3º Comercio:.....																			
AHORA, ¿CUÁL HA SIDO LA SITUACIÓN VIVIDA? <table border="0"> <tr> <td>LA ZONA DE C/D ESTABA LIBRE <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>HA ESPERADOMINUTOS A QUE ESTUVIESE LIBRE <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>HA APARCADO EN DOBLE FILA <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>VIENE DE OTRA ZONA DE CARGA /DESCARGA:</td> </tr> <tr> <td>- PARA ENTREGAR MERCANCÍA AL MISMO COMERCIO <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>- PARA ENTREGAR MERCANCÍA A OTRO COMERCIO <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>ENTREGAR LA MERCANCÍA A OTRA HORA O DÍA <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>OTRO:..... <input type="checkbox"/></td> </tr> </table>		LA ZONA DE C/D ESTABA LIBRE <input type="checkbox"/>	HA ESPERADOMINUTOS A QUE ESTUVIESE LIBRE <input type="checkbox"/>	HA APARCADO EN DOBLE FILA <input type="checkbox"/>	VIENE DE OTRA ZONA DE CARGA /DESCARGA:	- PARA ENTREGAR MERCANCÍA AL MISMO COMERCIO <input type="checkbox"/>	- PARA ENTREGAR MERCANCÍA A OTRO COMERCIO <input type="checkbox"/>	ENTREGAR LA MERCANCÍA A OTRA HORA O DÍA <input type="checkbox"/>	OTRO:..... <input type="checkbox"/>	¿CUÁNDO LA ZONA DE C/D ESTA LLENA QUE HACE? <table border="0"> <tr> <td>ESPERAR A QUE SE QUEDE LIBRE. <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>¿Durante cuanto tiempo?.....</td> </tr> <tr> <td>APARCAR EN DOBLE FILA <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>IR A OTRA ZONA DE CARGA /DESCARGA:</td> </tr> <tr> <td>- PARA ENTREGAR MERCANCÍA AL MISMO COMERCIO <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>- PARA ENTREGAR MERCANCÍA A OTRO COMERCIO <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>ENTREGAR LA MERCANCÍA A OTRA HORA O DÍA <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>NUNCA ME HE ENCONTRADO LA ZONA DE C/D LLENA <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>OTRO:..... <input type="checkbox"/></td> </tr> </table>		ESPERAR A QUE SE QUEDE LIBRE. <input type="checkbox"/>	¿Durante cuanto tiempo?.....	APARCAR EN DOBLE FILA <input type="checkbox"/>	IR A OTRA ZONA DE CARGA /DESCARGA:	- PARA ENTREGAR MERCANCÍA AL MISMO COMERCIO <input type="checkbox"/>	- PARA ENTREGAR MERCANCÍA A OTRO COMERCIO <input type="checkbox"/>	ENTREGAR LA MERCANCÍA A OTRA HORA O DÍA <input type="checkbox"/>	NUNCA ME HE ENCONTRADO LA ZONA DE C/D LLENA <input type="checkbox"/>	OTRO:..... <input type="checkbox"/>
LA ZONA DE C/D ESTABA LIBRE <input type="checkbox"/>																				
HA ESPERADOMINUTOS A QUE ESTUVIESE LIBRE <input type="checkbox"/>																				
HA APARCADO EN DOBLE FILA <input type="checkbox"/>																				
VIENE DE OTRA ZONA DE CARGA /DESCARGA:																				
- PARA ENTREGAR MERCANCÍA AL MISMO COMERCIO <input type="checkbox"/>																				
- PARA ENTREGAR MERCANCÍA A OTRO COMERCIO <input type="checkbox"/>																				
ENTREGAR LA MERCANCÍA A OTRA HORA O DÍA <input type="checkbox"/>																				
OTRO:..... <input type="checkbox"/>																				
ESPERAR A QUE SE QUEDE LIBRE. <input type="checkbox"/>																				
¿Durante cuanto tiempo?.....																				
APARCAR EN DOBLE FILA <input type="checkbox"/>																				
IR A OTRA ZONA DE CARGA /DESCARGA:																				
- PARA ENTREGAR MERCANCÍA AL MISMO COMERCIO <input type="checkbox"/>																				
- PARA ENTREGAR MERCANCÍA A OTRO COMERCIO <input type="checkbox"/>																				
ENTREGAR LA MERCANCÍA A OTRA HORA O DÍA <input type="checkbox"/>																				
NUNCA ME HE ENCONTRADO LA ZONA DE C/D LLENA <input type="checkbox"/>																				
OTRO:..... <input type="checkbox"/>																				

Figura 16. Encuesta realizada a los transportistas en las zonas de C/D

Las encuestas de preferencias reveladas se utilizan para analizar el comportamiento de los transportistas ante la situación actual (Ortúzar & Willumsen, 2011). En este estudio las encuestas realizadas permiten:

- Recopilar información para caracterizar el transporte urbano de mercancías.
- Obtener información sobre las preferencias reveladas a la hora de tomar la decisión de estacionar para realizar operaciones de C/D cuando una zona de C/D no está libre.

La encuesta se ha diseñado de manera que el orden de las preguntas facilite la respuesta del encuestado para así evitar que el cuestionario quede sin terminar. Para ello las preguntas de la encuesta son directas y simples, evitando preguntas que no aportan información.

La determinación del tamaño muestral necesaria para el análisis de los parámetros dependerá del margen de error aceptado, del nivel de confianza y del tamaño de la población. Utilizando una aproximación a la Normal (basada en el teorema central del límite), la fórmula para el cálculo del tamaño de la muestra es (Ortúzar & Willumsen, 2011):

$$n \geq \frac{p(1-p)}{\left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{p(1-p)}{N}} \quad (20)$$

- e: Error máximo = 10%
- z: Valor de la variable normal estandarizada para un determinado índice de confianza, en este caso un índice de confianza del 95% = 1,96
- N: La demanda total de las zonas de C/D del área de estudio/día, es decir, el total de vehículos que usan las zonas de carga y descarga (camionetas, furgonetas, pero también vehículos de servicio y coches).
- N1= número de vehículos que estrictamente hacen C/D. Estos datos se han obtenido de los estudios previos realizados.
- p= N1/N = 0,8
- n: número de encuestas a realizar.

El tamaño muestral mínimo necesario por tipología de mercancías es el siguiente (Tabla 6):

	N1	Nº DE ENCUESTAS NECESARIAS
Acc.hogar	773	56,9
Higiene personal	208	47,5
Textil	476	54,4
Construcción	297	50,9
Otros	981	57,8
Papelería	535	55,1
Productos alimenticios	2677	60,1
TOTAL	5948	382,8

Tabla 6. Tamaño muestral mínimo por tipología de mercancía

En la siguiente figura (Figura 17) se muestra la localización de las zonas de carga/descarga en las que se han realizado encuestas y la capacidad de cada zona de C/D. La capacidad de una zona de carga y descarga es igual al número de bahías de carga por la que está compuesta dicha zona, o lo que es lo mismo el número de vehículos de mercancías que pueden estar estacionados simultáneamente.

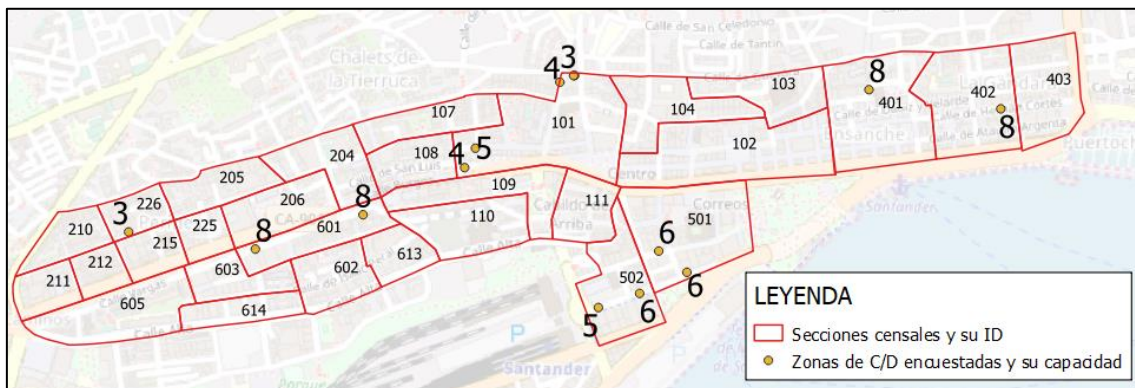


Figura 17. Zonas de carga y descarga en las que se han realizado encuestas.

Grabaciones de video en zonas de carga y descarga

También se han realizado grabaciones durante 7 días laborables (de lunes a sábado) entre las 7.00h. y las 14.00h. en 4 zonas de carga/descarga. Estas 4 zonas de carga y descarga han sido seleccionadas por su variedad en cuanto a características de las mismas se refiere, de manera que suponen una muestra representativa de las zonas de

C/D del centro de la ciudad en este aspecto. En la siguiente figura (Figura 18) se muestra la ubicación de estas 4 zonas de carga y descarga y su capacidad, es decir, el número de bahías de carga.

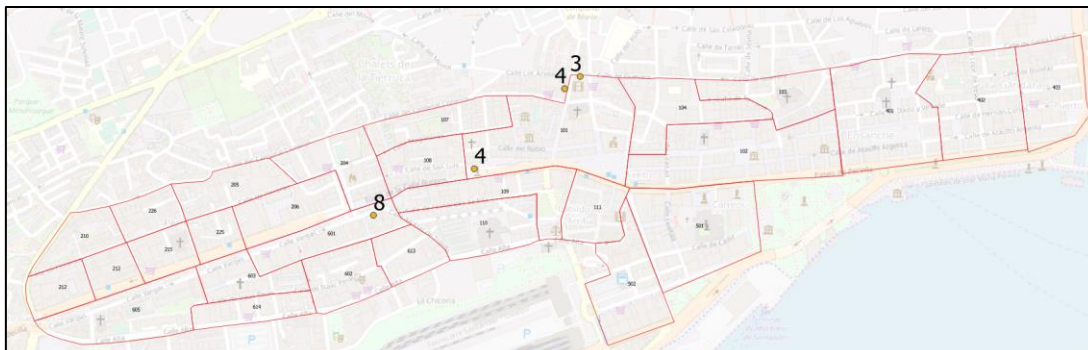


Figura 18. Zonas de carga/descarga grabadas durante 7 días.

De las encuestas y grabaciones realizadas se ha obtenido mucha información que permite, por un lado, comprobar y valorar los modelos desarrollados anteriormente. Por otro lado, aportan información sobre el uso que se hace de dichas zonas de carga y descarga como: demanda, hora de llegada, tiempo de realizar entrega, tipología de vehículo, ilegalidades producidas y ocupación.

4.4. Información recolectada

4.4.1. Demanda de transporte

El transporte urbano de Santander se clasifica en transporte de pasajeros privado, transporte público de pasajeros, que es en definitiva el autobús urbano, y transporte de mercancías. La red de la ciudad de Santander ha sido modelada y calibrada en diferentes proyectos e investigaciones llevadas a cabo en el departamento de transportes y tecnología de proyectos y procesos de la universidad de Cantabria teniendo en cuenta estos 3 tipos de transportes.

Demanda de transporte privado y público de pasajeros

Los datos de demanda de personas se obtuvieron a través de la encuesta domiciliaria disponible. La encuesta domiciliaria tiene un diario de viajes que permite caracterizar los viajes por hogar que se realizan en cada una de las zonas. Procesando los datos de esta encuesta y extrapolándolos mediante factores a toda la población del núcleo urbano se consiguen atracciones y generaciones zonales. Con estos datos se elabora una matriz inicial de viajes Origen – Destino.

Para el transporte privado la principal fuente de datos que se utiliza son los valores proporcionados por las espiras repartidas por la ciudad, ya que proporcionan el volumen de vehículos que circulan por los principales viales. Los datos de estas espiras son utilizados en el modelo para su validación.

Por otro lado, los datos necesarios para la validación del transporte público se recopilan en el sistema de ayuda a la explotación (SAE). Esta base de datos proporciona cifras de pasajeros que suben a cada uno de los autobuses, discretizando que línea utilizan y en qué parada cogen el autobús.

Demanda de transporte de mercancías

La obtención de la demanda de transporte de mercancías se basa en un estudio previo sobre la obtención de un modelo de demanda en las ciudades de Santander y Roma (Ibeas et al., 2012). Dicho modelo ha sido validado con la información actual obtenida de las encuestas y grabaciones realizadas. La demanda de transporte de mercancías se ha clasificado de acuerdo a siete tipos de mercancías: productos alimenticios, ropa, accesorios para el hogar, productos para el hogar e higiene personal, productos de papelería, materiales de construcción y otros materiales. El modelo de atracción desarrollado es un modelo de regresión que expresa la cantidad media de mercancía atraída por una zona d:

$$Q_d = \beta_{ad} * AD_d + \beta_{asa} * ASA_d \quad (61)$$

Donde:

- Q_d : cantidad media de mercancía atraída por la zona d.

- AD_d : número de empleados totales en la zona d.
- ASA_d : es una variable dummy que considera la capacidad de venta de la zona d en función de la densidad de tiendas. Es igual a 1 si el ratio entre empleados de comercios minoristas y los residentes en la zona es mayor del 35%.
- β_{ad} y β_{asa} : son parámetros calibrados para cada tipología de mercancía (Tabla 7).

	β_{ad}	β_{asa}
productos alimenticios	0,050	0
accesorios para el hogar	0,394	0
productos de papelería	0,136	0,66
ropa	0,034	0,12
productos para el hogar e higiene personal	0,070	0
materiales de construcción	0,366	0
otros materiales	0,196	0

Tabla 7. Valores de los parámetros β_{ad} y β_{asa}

Una vez que se obtiene la matriz de cantidad de mercancía atraída, se obtienen la matriz de entregas sabiendo que el tamaño de las entregas para las diferentes tipologías de mercancías es (Ibeas et al., 2012):

	Kg / entrega
productos alimenticios	590
accesorios para el hogar	502
productos de papelería	228
ropa	175
productos para el hogar e higiene personal	127
materiales de construcción	183
otros materiales	683

Tabla 8. Cantidad entregada clasificada por tipología de mercancía

De esta manera se obtienen el total de entregas diarias clasificada según su tipología. En la siguiente figura (Figura 19) se muestra las cantidades entregadas totales a cada sección censal (sin clasificar por tipología de mercancía):

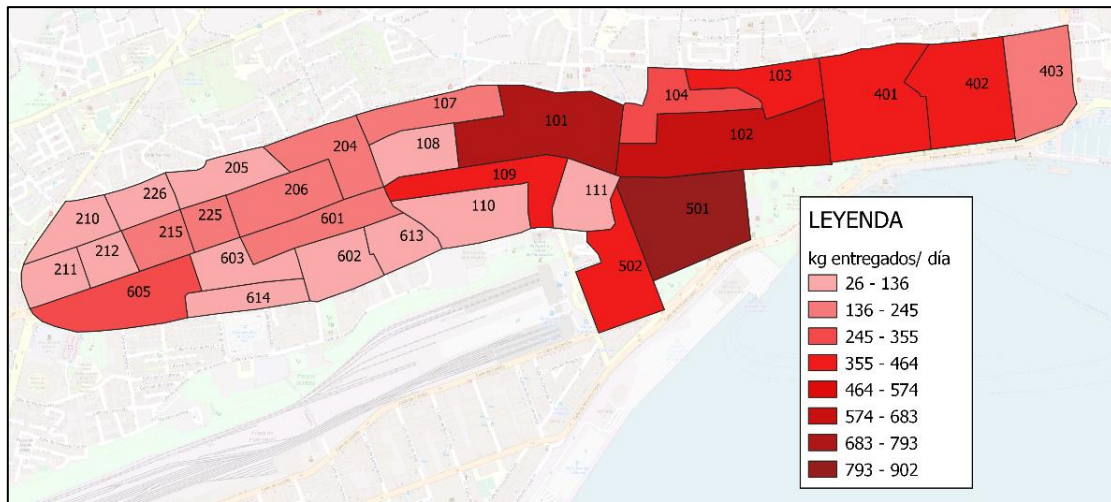


Figura 19. Kg entregados/ día en cada sección censal del centro de Santander

Un punto a tener en cuenta es que las entregas que se realizan en una zona pueden hacer uso o no de las zonas de carga/descarga. El 63% de los transportistas hacen uso de las zonas de carga y descarga sin embargo el resto no, ya sea porque el lugar de entrega dispone de una bahía propia para realizar las entregas, o porque deciden aparcar en otro lugar, en doble fila o sobre las aceras. Esto último es muy habitual en aquellas entregas que se realizan en horario nocturno en el que en una ciudad de tamaño medio el impacto de transporte es nulo.

Construcción del modelo de transporte de Santander

La construcción del modelo de transporte de Santander parte de un modelo que integra los datos disponibles de demanda y una red bien definida. Con ello se calibra, de manera que reproduzca con mayor fidelidad la realidad. El proceso de ajuste de la matriz en base a aforos es iterativo. En el proceso modifica la matriz con operaciones matemáticas, se asigna a la red modelizada y con los resultados obtenidos y los datos reales de comprobación se analiza la bondad del ajuste. En el caso de que el resultado no sea el óptimo se repite el proceso hasta conseguirlo.

Definida la demanda ajustada de los viajes de la situación actual se desarrolla el sub-modelo de partición modal mediante elección discreta de los modos de transporte de pasajeros. Las funciones de utilidad para cada uno de los modos se basan en variables obtenidas de la encuesta domiciliaria y tienen que reproducir la movilidad actual de la

ciudad. En este caso las funciones de utilidad de cada modo están centradas en los diferentes tiempos de funcionamiento de cada uno de ellos. Para el transporte público utiliza tiempos específicos: tiempo de acceso a la parada desde el origen (acc,B), tiempo de espera en la parada al autobús (esp,B), tiempo en el interior del vehículo (viaje, B) y por último el tiempo de egreso al destino (egr,B). En el caso del coche las variables escogidas para su reparto modal son el tiempo que tarda en realizar su viaje (viaje, C) y la distancia.

Los diferentes tiempos de funcionamiento de cada modo de transporte (privado y público) también tienen un valor económico, que para el caso de la ciudad de Santander han sido obtenidos de los proyectos desarrollados en la ciudad (Tabla 5) y son:

- $\varphi_{\text{viaje}, C} = 35 \text{ €/h.}$
- $\varphi_{\text{acc},B} = 37,5 \text{ €/h}$
- $\varphi_{\text{egr},B} = 37,5 \text{ €/h}$
- $\varphi_{\text{esp},B} = 62,1 \text{ €/h}$
- $\varphi_{\text{viaje},B} = 32 \text{ €/h}$
- $\varphi_{\text{trans},B} = 96 \text{ €/h}$

Para comprobar la bondad del reparto modal aplicado a la matriz total de viajes de pasajeros se utilizan los datos de aforos disponibles. Esta validación es igual a la realizada para la obtención de las matrices ajustadas, aunque hay que añadir un paso más, para comprobar que la distribución de la longitud de viajes sigue correspondiéndose con la movilidad de la ciudad. Para el transporte privado la comprobación del ajuste se realiza con los valores de las espiras reales con los obtenidos en la simulación tras el reparto modal en la misma ubicación, y con la distribución de la longitud de viajes para el vehículo privado. El proceso para el transporte público es el mismo, primero se comprueban los datos de la simulación con los reales correspondientes con la cantidad de pasajeros en la hora punta. La distribución de la longitud de los viajes hay que utilizarla también para comprobar que siguen representando la movilidad. En el caso del transporte de mercancías la distribución de la longitud de los viajes se realiza según el modelo desarrollado por Nuzzolo et al. (2012).

Con los resultados obtenidos en el proceso de análisis de la movilidad tras el reparto modal, se valida el modelo y por lo tanto las matrices de la situación actual. A

continuación, se simulan estas matrices en el programa de simulación con la red de Santander validada para poder así analizar la movilidad de la ciudad.

4.4.2. Caracterización de las zonas de carga y descarga

El centro de la ciudad se divide en 29 secciones censales las cuales cuentan con un total de 255 bahías de carga distribuidas en 56 zonas de C/D que son usadas por los diferentes transportistas. Para la aplicación de los modelos de optimización de espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga es necesario identificar y caracterizar las zonas de carga y descarga del centro de la ciudad. En la siguiente figura se muestra la ubicación de las zonas de carga y descarga (Figura 20) y en la Tabla 9 el número de zonas y bahías de carga/descarga por cada sección censal.

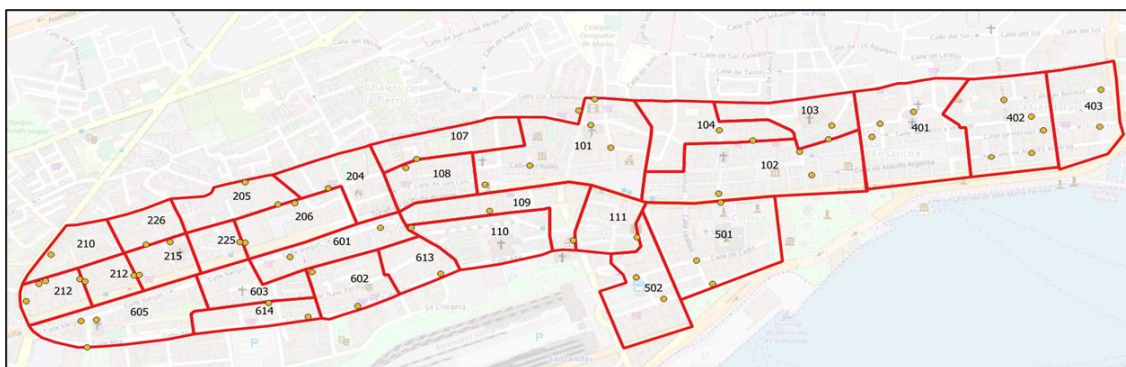


Figura 20. Ubicación de las zonas de carga y descarga

A la hora de definir el número de zonas y bahías de carga y descarga que hay en cada sección censal se ha prestado especial atención a aquellas zonas de C/D que se encuentran en el límite entre secciones, y en la zona perimetral del centro de la ciudad. El objetivo es asegurar que la sección donde se ubican es realmente la sección en la que hacen el servicio, y en caso de que no lo fuera, reubicar dicha zona de C/D a la sección censal al que se hace el servicio.

Sección censal	Nº de zonas de C/D	Nº de bahías de carga	Sección censal	Nº de zonas de C/D	Nº de bahías de carga
101	4	25	215	2	8
102	2	11	225	1	6
103	2	6	226	1	3
104	2	8	401	3	16
107	1	5	402	2	16
108	1	3	403	2	14
109	2	8	501	2	20
110	1	4	502	2	16
111	1	4	601	2	16
204	1	3	602	2	8
205	2	4	603	1	4
206	1	4	605	2	18
210	2	6	613	1	2
211	1	4	614	1	5
212	1	8			
			SUMA	48	255

Tabla 9. Número de zonas y bahías de carga y descarga en el centro de Santander.

La morfología y características de la calle en la que se encuentran las zonas de carga y descarga también se han analizado:

- Número de carriles por sentido
- Existencia o no de aceras
- Limitaciones físicas en las aceras: bolardos, contenedores de basura, barandillas, losas de hormigón de protección de contenedores etc.
- Tipos de aparcamientos: coches, paradas de autobús, paradas de taxi, zonas restringidas al aparcamiento etc.
- Tipología de intersecciones: semaforizada, sin señalizar, glorieta etc.

En la Tabla 10 se muestran, como ejemplo, las características de las 4 zonas de C/D en las que se han realizado grabaciones ya que son una muestra representativa de la variabilidad de las zonas de C/D.

	Calle Jesús de Monasterio	Calle Vargas	Plaza La Leña	Calle Cervantes
Capacidad (vehículos)	4	8	3	4
Características de la vía	Dos carriles de un único sentido	Un único carril sin obstáculos en la acera opuesta	Dos carriles de un único sentido y un semáforo al inicio de la zona de C/D	Un único carril con obstáculo físico (bolardo) en la acera opuesta
Características delante de la zona de C/D	Parada de taxi	aparcamientos	acera	Contenedores de basura protegidos con losas de hormigón
Características detrás de la zona de C/D	Sin obstáculos físicos ni aparcamientos	Contenedores de basura protegidos con bolardos	Contenedores de basura protegidos con losas de hormigón	Sin obstáculos físicos ni aparcamientos
Posibilidad de aparcamiento ilegal	Doble fila y sobre área restringida (detrás de la zona de C/D)	Sobre la acera opuesta	En doble fila	En área restringida (detrás de la zona de C/D)

Tabla 10. Características de las zonas de C/D grabadas

Basándonos en estas 4 zonas de C/D hemos asimilado el resto de las zonas a estas cuatro (Tabla 11). De esta manera se han clasificado todas las zonas de C/D basándonos en las características de la calle y la propia zona de C/D, y asimilándolas a las descritas con detalle en la Tabla 10:

	Nº de zonas de C/D asimilables a:
Calle Jesús de Monasterio	6
Calle Vargas	8
Plaza La Leña	7
Calle Cervantes	17
No se asimila a ninguna (sin posibilidad de aparcar ilegalmente)	10

Tabla 11. Clasificación de las zonas de C/D según sus características

Regulación de las zonas de carga y descarga en Santander

El uso de las zonas de C/D viene regulada por la Ordenanza de Circulación de Exmo. Ayuntamiento de Santander (Santander, 2016). La cuál establece las siguientes regulaciones en las zonas de C/D del centro de la ciudad:

- Tipología de vehículos de mercancías que pueden usarlas: vehículos entre 1.8-8 toneladas de MMA.
- Ventana temporal reservada para realizar operaciones de carga y descarga: entre las 7:00 y las 14:00 en días laborables y sábados.
- Tiempo máximo autorizado de estacionamiento: 30 minutos.

4.4.3. Caracterización de los vehículos que usan las zonas de carga y descarga

Tipología de vehículos que usan las zonas de C/D

La tipología de vehículos de mercancías que usan las zonas de carga/descarga se han clasificado según sus características tal y como se muestra en la siguiente tabla (Tabla 12):

	Longitud (m.)	Anchura (m.)	MMA (ton)	Ejemplo
coche (C)	3.5-4.6	1.7- 2		
Veh. de mercancías ligeros (LF)	4.3-4.9	1.8- 2	< 3	Vehículo mixto: para pasajeros y mercancías
Veh. de mercancías medio (MF)	4.8- 6	1.8- 2	3 - 4.5	Furgoneta de reparto
Veh. de mercancías pesado (HF)	5.3-6.5	2-2.5	4.5 -8	Camión de reparto

Tabla 12. Tipología de vehículos de mercancías.

De las grabaciones realizadas se ha obtenido que la distribución por tipología de vehículo es la siguiente (Figura 21):

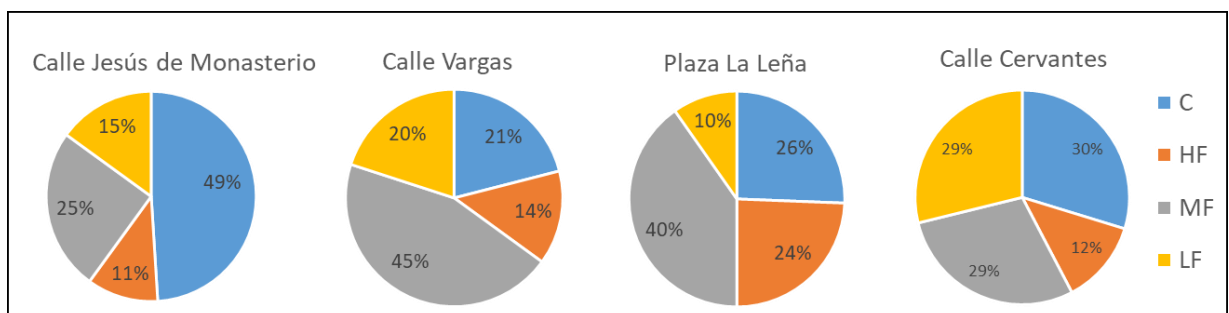


Figura 21. Tipología de vehículos que usan las zonas de C/D

Durante la elaboración de las encuestas en otras zonas de C/D también se detectó que los coches usaban las zonas de carga y descarga, siendo el porcentaje de coches que las usaban entre un 20 y 35% del total de vehículos. Se ha observado que los vehículos de mercancías que no están permitidos en el centro de la ciudad no hacen uso de las zonas de carga/descarga, por lo que no se ha detectado ningún tipo de ilegalidad en este aspecto. Sin embargo, los coches hacen uso de las zonas de C/D a pesar de estar prohibido.

Distribución de Llegadas de los vehículos de mercancías a las zonas de C/D

Los vehículos de mercancías tienen las zonas de carga y descarga de uso exclusivo entre las 7:00h y las 14:00h. en días laborables. Sin embargo, esto no implica que los vehículos de mercancías no realicen entregas fuera de esta franja horaria, el 19% de los vehículos de mercancías que realizan reparto en un día lo hacen fuera de ese horario.

Distribución de llegadas media de las zonas de C/D grabadas y encuestadas es:

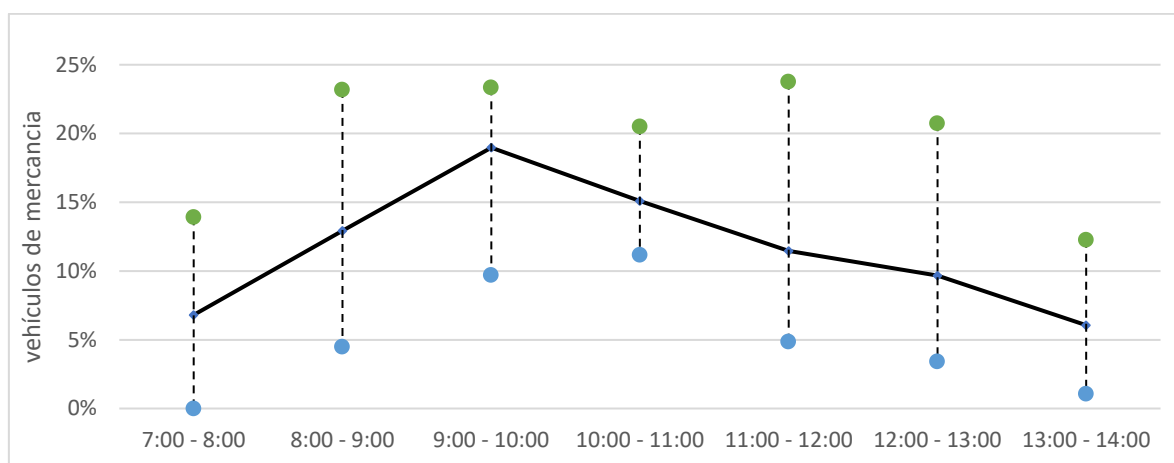


Figura 22. Distribución de Llegadas a las zonas de C/D

La distribución de llegadas de vehículos a las 4 zonas de C/D en las que se han realizado grabaciones se tiene de una manera más detallada, pudiendo detectar que apenas hay variaciones entre unas y otras, a excepción de la franja horaria entre las 11:00 – 12:00h. en las que se observa diferencia (Figura 23):

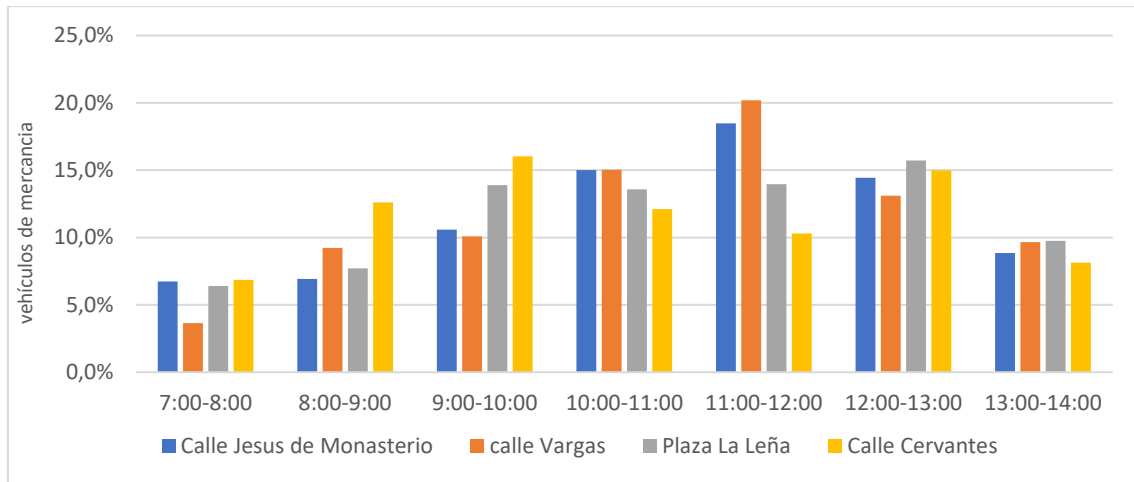


Figura 23. Distribución de la demanda en las 4 zonas de C/D grabadas

Distribución del tiempo de entrega de mercancías

El tiempo que los transportistas dedican a realizar las entregas se ha obtenido de las encuestas y las grabaciones realizadas. El tiempo de entrega sigue diferentes distribuciones en función de la tipología de vehículo (Tabla 13). Se ha realizado el test de bondad de Pearson para asegurar la validez de estas distribuciones con un nivel de significancia del 95% en todas las tipologías.

La tipología de servicio, es decir, transportista por cuenta propia o mayorista, no influye en el tiempo de entrega, es por ello que no se ha hecho ningún tipo de distinción en este aspecto.

Tipo de vehículo	Distribución	Expresión
Coche	Weibull	-0,001 + Weib (9,17;0,88)
LF	Weibull	0,999 + Weib (23,8; 0,638)
MF	Lognormal	-0,001 + Logn (26,6; 70)
HF	Weibull	-0,001 + Weib (17,9;0,932)

Tabla 13. Distribución del tiempo de aparcamiento por tipología de vehículo

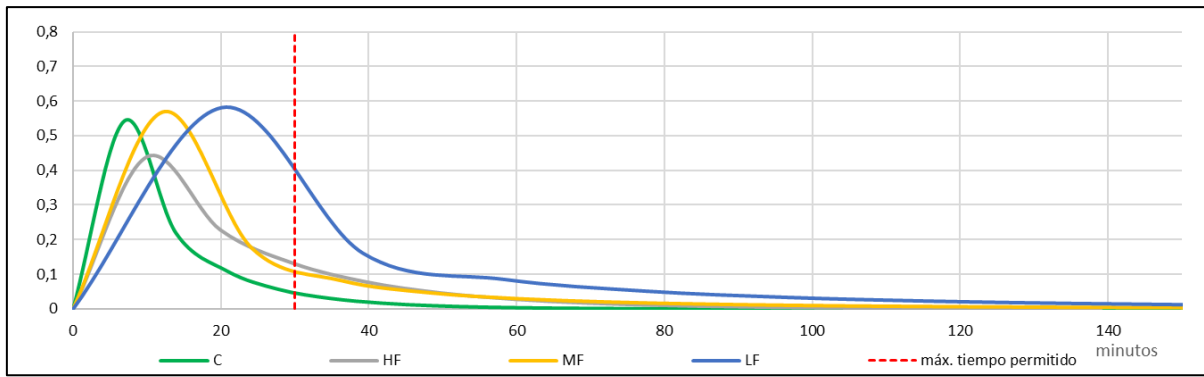


Figura 24. Distribución de probabilidad del tiempo de aparcamiento por tipología de vehículo

Comportamiento de los transportistas e ilegalidades en las zonas de carga y descarga

De las encuestas y grabaciones realizadas se ha querido obtener la situación que se encuentran los transportistas cuando llegan a una zona de C/D. Se detectó que solamente el 56% de los vehículos de mercancías encuentra una bahía de carga libre. Cuando la bahía de carga no está libre los transportistas tienen que tomar una decisión, siendo la más habitual la de aparcar de manera ilegal. Otra alternativa es esperar que la bahía se quede libre o tomar otra decisión como puede ser ir a otra zona de C/D para servir al mismo comercio, o ir a otra zona de C/D a servir a otro comercio (Figura 25).

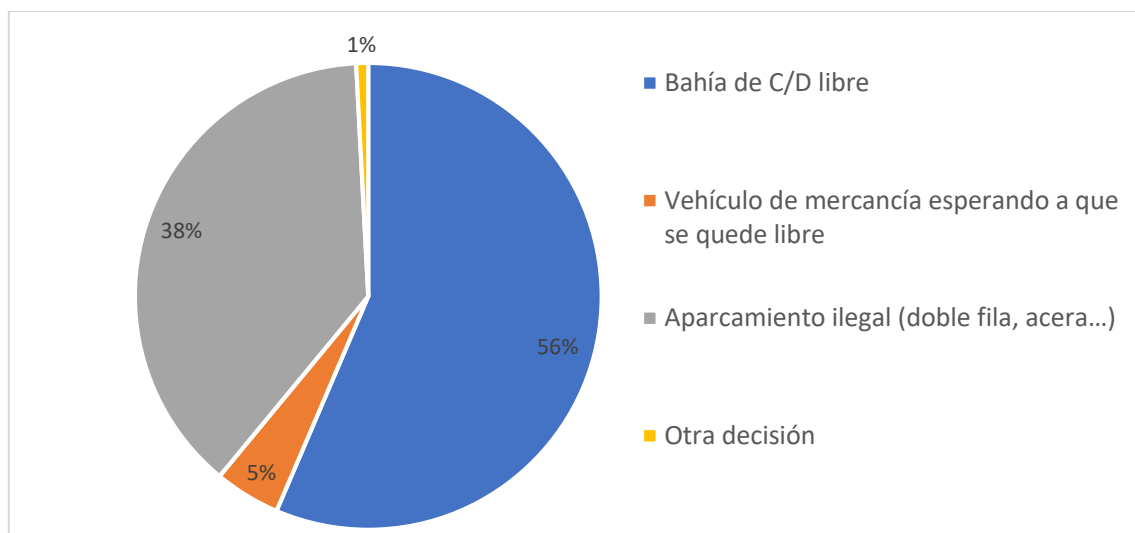


Figura 25. Comportamiento de los transportistas en las zonas de C/D en cuanto al aparcamiento

Además, a aquellos transportistas que se encontraron una bahía libre en el momento de la realización de las encuestas, se les pregunto que habían hecho en otras ocasiones cuando la zona de C/D estaba llena. Todos los encuestados afirmaron que en más de una ocasión se habían encontrado la zona de C/D llena y habían tenido que tomar una decisión sobre qué hacer. Teniendo en cuenta esa información se ha obtenido que solo el 16% de los encuestados están dispuestos a esperar a tener una bahía de carga libre, y que el tiempo medio que están los transportistas dispuestos a esperar es de 8 minutos. El resto de los transportistas encuestados no están dispuestos a esperar y toman otra decisión como: aparcar en doble fila o sobre las aceras (84%), ir a otra zona de carga y descarga (11%), ir a aparcar a una zona de aparcamiento de coches de pago (1%) o tomar otra decisión (4%).

Cabe mencionar que, aunque los transportistas en las encuestas indican que están dispuestos a esperar una media de 8 minutos, de las grabaciones realizadas se observa que este tiempo es mucho menos, siendo una media de 1,2 minutos.

Por otro lado, durante las encuestas, se les preguntaba a los transportistas la distancia al comercio o a los comercios a los que entregaban mercancía. Se observa que apenas un 6% de los encuestados necesita desplazarse más de 250 metros, siendo la media de desplazamiento 85m.

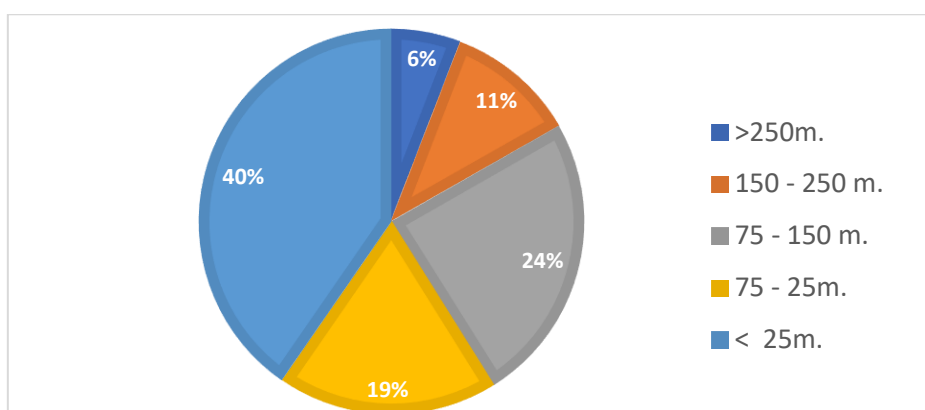


Figura 26. Distancia entre la zona de C/D y el comercio

Por otro lado, se han analizado las ilegalidades que se han detectado durante la elaboración de las encuestas y las observadas en las grabaciones. Se ha analizado en detalle las 4 zonas de C/D grabadas, caracterizando las ilegalidades realizadas según la

tipología de ilegalidad. Se diferencia entre ilegalidad por tipología de vehículo, es decir, la zona de C/D esta usada por vehículos no permitidos, que en el caso de la ciudad de Santander siempre son coches. Otra de las ilegalidades que se producen son debidas a un exceso en el tiempo de aparcamiento en las zonas de C/D, superando el límite de 30 minutos establecido por la ordenanza municipal (Tabla 14):

		Calle Jesús de Monasterio	Calle Vargas	Plaza La Leña	Calle Cervantes
Uso ilegal de las zonas de C/D	Por tipología de vehículo	49%	21%	21%	30%
	Por tiempo excesivo de aparcamiento	12%	30%	25%	30%
	Por tipología y tiempo excesivo de aparcamiento	58%	47%	44%	56%
Ilegalidades en torno a las zonas de C/D	Doble fila	32%	0%	34%	0%
	Sobre la acera	0%	43%	0%	0%
	En zonas restringidas	13%	0%	0%	55%

Tabla 14. Uso ilegal de las zonas de C/D y sus alrededores.

4.4.4. Líneas y paradas de autobús.

La red de transporte público de Santander está compuesta por líneas y paradas de autobús urbano. En total cuenta con un total de 19 líneas de transporte en horario diurno, que conectan el centro de la ciudad con los barrios, tanto periféricos, como los limítrofes con el centro.

Las paradas de autobús del centro de Santander en general son usadas por varias líneas que hacen que el centro esté conectado con barrios más periféricos de la ciudad. Sin embargo, hay excepciones, existiendo algunas paradas de autobús que únicamente son usadas por una línea y con una frecuencia de paso baja. Es el caso de las paradas de autobús que se muestran en la Figura 27, las cual son usadas únicamente por la línea 11. El intervalo de paso teórico por parada varía entre los 30 o 45 minutos, en días laborables, y entre 1 y 1,25 horas los sábados, domingos y festivos.

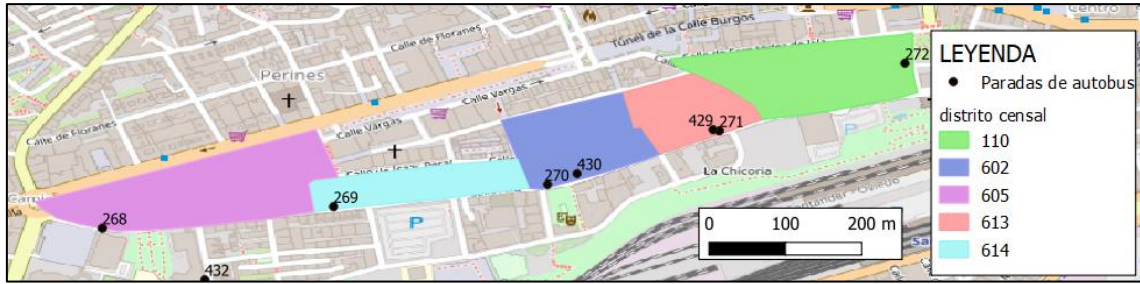


Figura 27. Paradas de autobús con baja frecuencia de paso.

En la siguiente figura (Figura 28) se muestra una de las paradas de autobús mencionadas, la parada 268 ubicada en la sección censal 605. En las imágenes se pueden ver dos situaciones totalmente opuestas, una en la que la parada está libre y otra en la que hay aparcados dos vehículos de mercancías, aunque está prohibido el estacionamiento de estos. Estos vehículos están aparcando de manera ilegal porque la zona de carga y descarga contigua a la parada se encuentra llena. Esto puede producir que, si en ese momento llega un autobús urbano, no tenga la parada de autobús libre para que los usuarios del mismo puedan subir y bajar. Regular y controlar estas situaciones es importante para aumentar el uso de las paradas de autobús, pero sin disminuir la eficacia de los autobuses urbanos.



Figura 28. Parada de autobús vacía vs ocupada ilegalmente por vehículos de mercancía.

En esta parada de autobús (parada 268) la hora teórica de paso durante el período de tiempo en el que las zonas de carga/descarga están reservadas para transporte de mercancías (7:00-14:00h.) es la que se muestra en la Tabla 15. En esa misma tabla también se muestra el intervalo de tiempo entre pasos de autobús, el cual será el mismo

para todas las paradas mencionadas anteriormente, ya que por todas ellas pasa la misma línea de autobús.

Día laborable		Sábados, domingos y festivos	
hora teórica de paso	intervalo de tiempo entre autobuses (min)	hora teórica de paso	intervalo de tiempo entre autobuses (min)
7:56:00	0:30:00	8:26:00	1:00:00
8:26:00	0:30:00	9:26:00	1:15:00
8:56:00	0:30:00	10:41:00	1:00:00
9:26:00	0:45:00	11:41:00	1:15:00
10:11:00	0:30:00	12:56:00	1:00:00
10:41:00	0:30:00	13:56:00	1:00:00
11:11:00	0:30:00		
11:41:00	0:45:00		
12:26:00	0:30:00		
12:56:00	0:30:00		
13:26:00	0:30:00		
13:56:00	0:30:00		

Tabla 15. Hora teórica de paso y frecuencia de paso de la parada de autobús 268.

Los datos mostrados en la Tabla 15 son datos teóricos, sin embargo, también se han obtenido datos históricos de paso de los autobuses por las paradas de estudio obtenidas del sistema GPS de los autobuses. Se han tomado datos históricos de dos semanas al azar sin ningún tipo de incidencia que pudiese modificar la frecuencia habitual de paso. Estos datos históricos indican que se producen retrasos y adelantos medios de 2.5 ± 1.7 minutos, con respecto la hora de paso teórica. El tiempo de parada para subida/bajada de pasajeros en cada parada también es conocido. Puesto que la diferencia del tiempo de parada en las diferentes paradas de autobús analizadas es mínima, se ha decidido tomar como hipótesis que la duración es la misma, 1 minuto.

En cuanto a las paradas de autobús analizadas conocemos su longitud, la cual será necesaria para saber cuál es su capacidad en términos de vehículos de mercancías (Tabla 16).

Sección censal	605	614	602		613		110
Paradas de autobús analizadas	268	269	270	430	271	429	272
longitud de BS	17,3	19,5	22,3	17,2	11,5	17,3	10

Tabla 16. Longitud de las paradas de autobús analizadas.

Capítulo 5

Resultados del caso de estudio

5.1. Aplicación de los modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga

5.1.1. Aplicación de la metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga

La metodología de análisis del uso de las zonas de carga y descarga ha sido aplicada en el centro de la ciudad. Para ello las 56 zonas de carga y descarga han sido agrupadas en cinco grupos según las características físicas de las zonas de C/D y sus alrededores (Tabla 11). Por un lado, se han agrupado aquellas zonas de C/D que debido a sus características no es posible que se realicen ilegalidades (a excepción de uso por vehículos no autorizados), y por otro lado, el resto de las zonas de C/D se han agrupado en 4 grupos en las que es posible realizar cualquier tipo de ilegalidad. De cada uno de ellos, se ha seleccionado una zona de C/D representativa en base a la información y observaciones recolectadas durante la elaboración de las encuestas. En estas 4 zonas de C/D representativas, se ha realizado un análisis profundo de sus características y del uso de las mismas. Estas 4 zonas se denominarán según la calle en la que se encuentran ubicadas.

Las características de estas 4 zonas han sido descritas en el capítulo anterior “04- Descripción del caso de estudio”, así como la regulación de estas zonas, la tipología de

vehículos que las usan, la distribución de llegadas, la distribución del tiempo de entrega y las ilegalidades que en ellas se producen.

Además de toda esta información, se ha analizado la ocupación de las 4 zonas de carga/descarga por cualquier tipo de vehículo durante los 7 días en los que se realizaron grabaciones, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente figura (Figura 29). Se representa la ocupación máxima y media en las zonas de C/D en azul. La ocupación en los alrededores de las zonas de C/D, que están estacionados de manera ilegal por cualquier tipo de vehículo, se presenta en color verde, tanto la ocupación máxima como la media. Además, la capacidad de cada zona de C/D se representa con una línea amarilla para así poder comparar rápidamente con la ocupación actual.

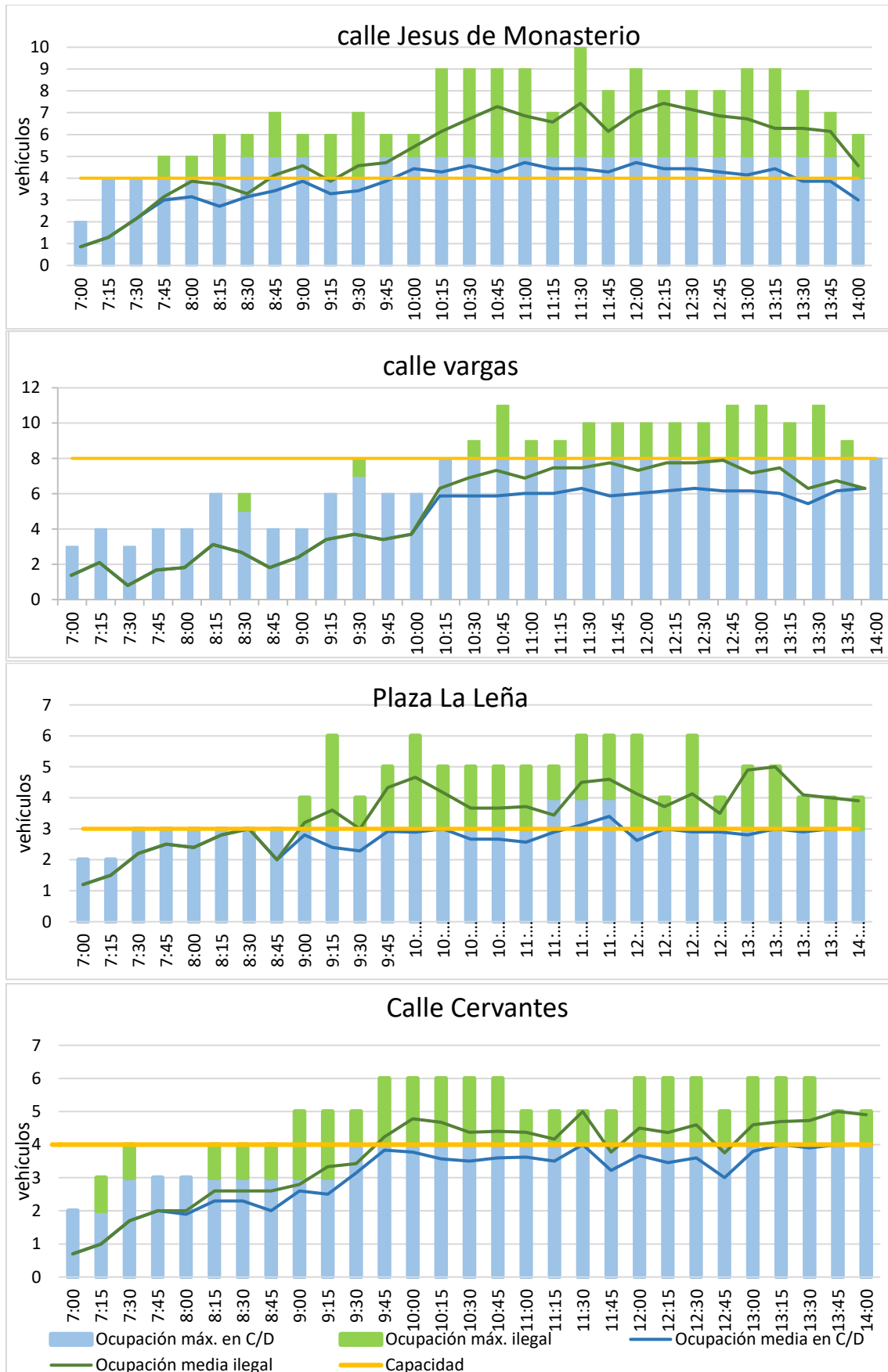


Figura 29. Ocupación en las zonas de C/D, en doble fila, en las aceras y en zona restringida en las zonas de C/D analizadas.

De la Figura 29 se pueden observar diferentes situaciones:

- La ocupación media en la zona de C/D supera la capacidad, como es el caso de la calle Jesús de Monasterio, que además la ocupación máxima durante gran parte de la mañana es un vehículo más que la capacidad.
- La ocupación media en la zona de C/D no alcanza nunca la capacidad, siendo en el caso de la calle Vargas como máximo dos vehículos menos.
- La ocupación media en la zona de C/D es aproximadamente igual a la capacidad, es el caso de la plaza La Leña.
- La ocupación media en la zona de C/D es ligeramente menor a la capacidad, es el caso de la calle Cervantes.

Las razones por las que esto ocurre se deben a diferentes motivos. De todos ellos, la capacidad, la morfología de las zonas de C/D y la tipología de vehículos que usan dichas zonas influyen de la siguiente manera:

- Cuanto mayor es la capacidad de la zona menos eficiente es su uso, esto se debe a que los vehículos de mercancías no siempre aparcan de manera ordenada para optimizar su uso. Se ha observado que cuando la capacidad es mayor de 5 vehículos, difícilmente se alcanza la capacidad de la zona de C/D.
- La morfología de la zona, es decir, la tipología de obstáculo en la parte posterior y anterior de la zona de C/D, en el caso de que haya, influye en su uso. Es decir, se ha observado que se realiza un uso más eficiente de la zona de C/D cuando no existen obstáculos físicos, ni bolardos ni losas de hormigón (el caso de las calles Jesús de Monasterio y Cervantes).
- Los diferentes vehículos que usan las zonas de C/D tienen diferente longitud, por lo tanto, conocer que tipología de vehículos usan esas zonas de C/D es útil para dimensionar la longitud y capacidad de la zona de C/D. Esta es una de las razones por la que en la calle Jesús de Monasterio la ocupación media supera la capacidad, el 49% de los vehículos son coches.

Las ilegalidades que se producen en estas zonas de C/D (descritas en el capítulo 4), son debidas tanto por el tipo de vehículo que las usa, como por el tiempo que los vehículos

están estacionados. Estas ilegalidades también influyen en el uso eficiente de las zonas de carga y descarga.

Para determinar cuantitativamente las consecuencias de estas ilegalidades, se han definido 7 escenarios (Figura 7), que varían en el grado de incumplimiento de la normativa y en la tipología de ilegalidad.

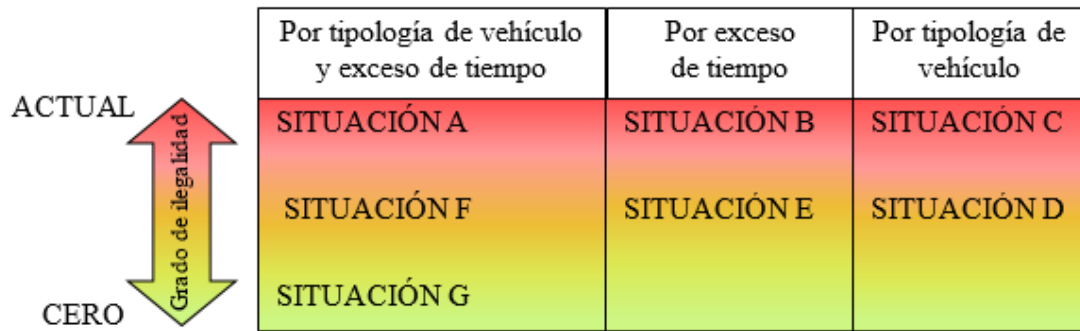


Figura 7. Esquema de los diferentes escenarios analizados en el modelo de análisis de uso de las zonas de C/D

El tiempo de entrega de las mercancías varía para los diferentes escenarios siguiendo diferentes distribuciones tal y como se muestra en la siguiente tabla (Tabla 17):

Distribución del tiempo de entrega de mercancías			
	SITUACIÓN A y B	SITUACIÓN C, D y G.	SITUACIÓN E y F
	INFORMACIÓN RECOLECTADA	LIMITANDO LA DURACIÓN A 30 MIN	LIMITANDO LA DURACIÓN A 35 MIN
LF	$0,999 + \text{Weib}(23,8; 0,638)$	$0,5 + 30 * \text{Beta}(0,499; 0,466)$	$0,5 + 35 * \text{Beta}(0,616; 0,591)$
MF	$-0,001 + \text{Logn}(26,6; 70)$	$-0,5 + \text{Logn}(13,8; 15,6)$	$-0,5 + \text{Logn}(14,8; 15,2)$
HF	$-0,001 + \text{Weib}(17,9; 0,932)$	$-0,5 + \text{Logn}(13,9; 13,3)$	$-0,5 + \text{Logn}(14,8; 15,2)$

Tabla 17. Distribución del tiempo de entrega de mercancías para los escenarios planteados en la metodología de análisis del uso de las zonas de C/D.

En primer lugar, se ha simulado la situación actual (situación A) en un simulador de eventos discretos (Rockwell Arena). Para realizar la simulación de la situación actual se han realizado 100 replicaciones teniendo en cuenta las variables descritas anteriormente: la demanda de los diferentes vehículos, la distribución de llegadas, el

tiempo de estacionamiento de cada vehículo, así como el tipo y grado de ilegalidad. En la siguiente tabla (Tabla 18) se muestra el porcentaje de ilegalidad de cada tipo tanto de los datos recolectados como los simulados.

			Calle Jesús de Monasterio	Calle Vargas	Plaza La Leña	Calle Cervantes
% ilegalidades debido al tipo de vehículo	Datos recolectados		49%	21%	21%	30%
	Datos simulados	Media	48%	18%	17%	27%
		Desviación	16%	6%	8%	12%
% ilegalidades por exceso de tiempo	Datos recolectados		12%	30%	25%	30%
	Datos simulados	Media	9%	20%	21%	21%
		Desviación	3%	5%	6%	6%

Tabla 18. Porcentaje de ilegalidades simuladas en las zonas de C/D grabadas

El porcentaje de ilegalidades por exceso de tiempo representa la cantidad de vehículos que realizan dichas ilegalidades, sin embargo, hay que tener cuenta que el tiempo que exceden es una variable importante. Por ese motivo en la siguiente figura (Figura 30) se muestra los datos de ocupación de las zonas de C/D. Se presentan los datos recolectados durante las encuestas y las grabaciones de vídeo en color rojo, y los datos simulados con su intervalo de confianza (95%) en línea negra y gris respectivamente.

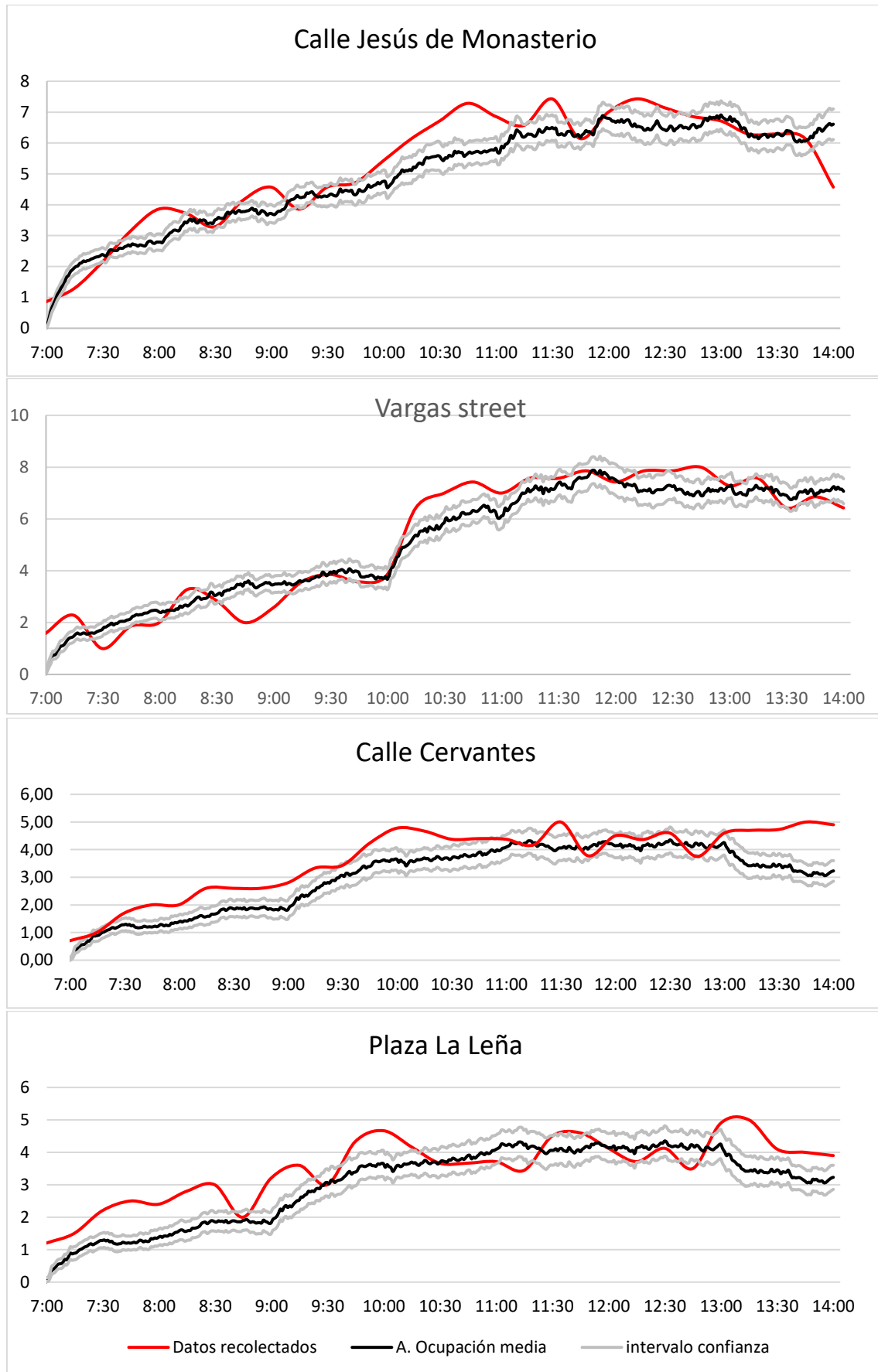


Figura 30. Ocupación en las zonas de C/D grabadas. Datos recolectados vs datos simulados

Se puede observar que el ajuste es menos preciso a primeras horas de la mañana, sobre todo en la calle Cervantes y en la Plaza La Leña, sin embargo, en las horas punta cuándo la problemática es mayor, las simulaciones se ajustan muy bien a los datos recolectados.

En base a la simulación de la situación actual (Escenario A), se simulan el resto de escenarios. Estos siete escenarios se han simulado también en el software Rockwell Arena durante 100 replicaciones, obteniendo diferentes indicadores, entre ellos la ocupación media en cada una de las 4 zonas de C/D analizadas (Figura 31).

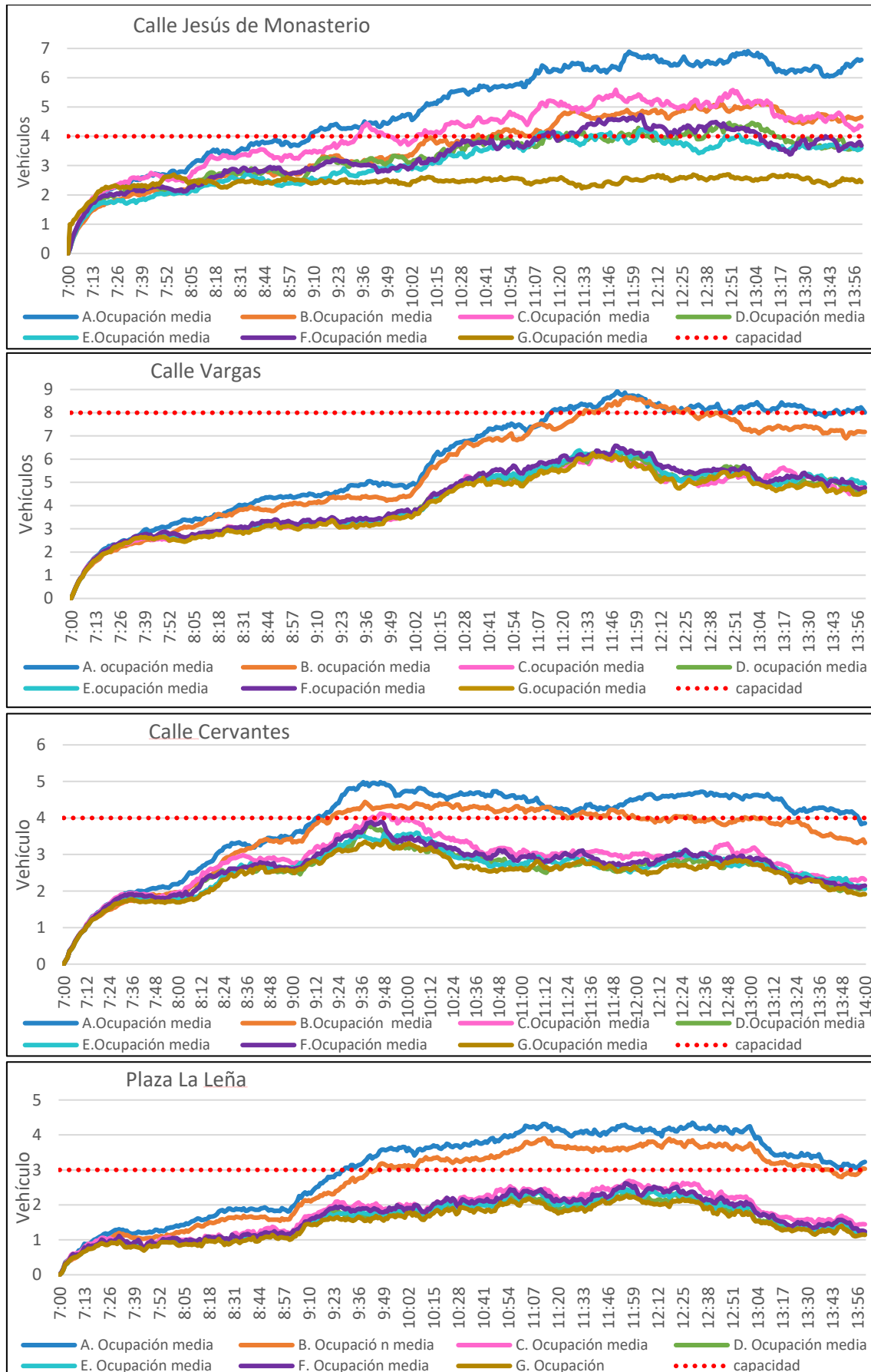


Figura 31. Ocupación media de las 4 zonas de C/D en las 7 situaciones planteadas.

Podemos observar que en general, la situación B, en la que existe el mismo exceso de tiempo de estacionamiento que en la situación actual pero no se permite el uso de la zona de C/D por coches, la situación apenas mejora con respecto a la situación actual. La única zona de C/D en la que se realiza una mejora notable es en la zona de C/D de la calle Jesús de Monasterio. Esto se debe al alto porcentaje de ilegalidad por tipología de vehículos (coches) en comparación con las ilegalidades por exceso de tiempo, y en comparación con las otras 3 zonas. Es por ello que se puede deducir que el impacto de un vehículo realizando ilegalidad por exceso de tiempo es mayor que si realizase ilegalidad por tipología de vehículo, considerando los tiempos de estacionamiento actuales.

Si prestamos atención a las situaciones D, E y F, situaciones en las que el grado de ilegalidad es próximo a cero, la diferencias son mínimas entre las 3 situaciones, y en comparación con la situación ideal, situación G, en la que se cumple estrictamente la regulación existente. La excepción vuelve a situarse en la zona de C/D de la calle Jesús de Monasterio, por la misma razón que anteriormente, el alto grado de ilegalidad por tipología de vehículos triplica a la ilegalidad por exceso de tiempo.

Una vez se ha obtenido la ocupación media en las zonas de C/D en las 7 situaciones, podemos obtener, para la hora punta de cada zona de C/D, el nº medio de bahías de C/D usados incorrectamente, así como el intervalo de confianza. Una bahía de C/D tiene que ser usada completamente, es decir, un vehículo de mercancías necesita una bahía entera, si el espacio disponible es menos de una bahía no le es suficiente para poder aparcar. Por este motivo se ha redondeado el número de bahías de C/D usadas de manera inadecuada, y se ha realizado una estimación de los m² de espacio público, que están siendo incorrectamente utilizados (Tabla 19). Estos m² se han estimado en base a las dimensiones medias de los vehículos y la tipología de vehículos que usan cada zona, obteniendo que un vehículo ocupa una media de 9.6 m². Se entiende por espacio usado incorrectamente, aquel que está siendo desaprovechado o utilizado para un fin para el que no ha sido diseñado, ya sea un espacio en una zona de C/D, en doble fila, en acera o en espacio restringido.

		ESCENARIOS						
		A	B	C	D	E	F	G
Calle Jesús de	Nº medio de C/D usadas incorrectamente	2,91	1,25	1,59	0,46	0,31	0,73	0
	Intervalo de confianza (95%)	0,36	0,32	0,32	0,28	0,26	0,28	0
	Nº de bahías de C/D usadas incorrectamente	3	2	2	1	0	1	0
	m ² medios de espacio público usado incorrectamente	28,8	19,2	19,2	9,6	0	9,6	0
Calle Vargas	Nº medio de C/D usadas incorrectamente	1,9	1,67	1	1	1	1	1
	Intervalo de confianza (95%)	0,4	0,4	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Nº de bahías de C/D usadas incorrectamente	2	2	1	1	1	1	1
	m ² medios de espacio público usado incorrectamente	19,2	19,2	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
Plaza La Leña	Nº medio de C/D usadas incorrectamente	1,35	0,9	0	0	0	0	0
	Intervalo de confianza (95%)	0,36	0,32	0,01	0	0	0	0
	Nº de bahías de C/D usadas incorrectamente	2	1	0	0	0	0	0
	m ² medios de espacio público usado incorrectamente	19,2	9,6	0	0	0	0	0
Calle Cervantes	Nº medio de C/D usadas incorrectamente	0,98	0,44	0,12	0	0	0	0
	Intervalo de confianza (95%)	0,31	0,28	0,09	0,02	0	0	0
	Nº de bahías de C/D usadas incorrectamente	1	1	0	0	0	0	0
	m ² medios de espacio público usado incorrectamente	9,6	9,6	0	0	0	0	0

Tabla 19. Nº de C/D y m² de espacio público mal usados en las 7 situaciones y para las 4 zonas de C/D analizadas

Si analizamos los resultados obtenidos, se observa que, en la situación actual, se estima que un total de 76.8 m² están siendo usados de manera incorrecta en el conjunto de las zonas de C/D analizadas. Además, cabe mencionar que, aunque la situación sea la ideal, la zona de C/D de la calle Vargas siempre habrá al menos un espacio mal usado, por el

motivo que se ha mencionado anteriormente: esta zona nunca alcanza su capacidad (8 vehículos de mercancías) debido a que los vehículos no son capaces de ordenarse para optimizar su uso, y como consecuencia de ello siempre hay un espacio sin usar.

En definitiva, se pueden diferenciar dos tipos de espacios públicos mal usados en la calle donde están ubicadas las zonas de C/D:

- Según las características de la calle en la que está ubicada la zona de C/D, lo cual supondría 67.2 m² en el conjunto de zonas de C/D analizadas
- Según la capacidad de la zona de C/D, lo cual supone 9.6 m² en el conjunto de zonas de C/D analizadas, que corresponde con la zona de C/D de la calle Vargas.

Por otro lado, el porcentaje de ilegalidades, tanto por tiempo de estacionamiento como por tipología de vehículo es similar en todas las zonas de C/D, a excepción de la calle Jesús de Monasterio en la que las ilegalidades por duración de estacionamiento son menores. Sin embargo, se puede observar que las ilegalidades por duración del estacionamiento (escenario B), tiene igual o mayor impacto que las ilegalidades por tipología de vehículo (escenario C).

Estos resultados se pueden trasladar a todo el centro de la ciudad, donde el espacio público escasea, para así estimar el espacio público mal usado actualmente. El centro de la ciudad dispone de 56 zonas de C/D, las cuales se han clasificado en 5 grupos, tal y como se ha mencionado anteriormente. Cabe destacar que 10 zonas de C/D tienen una capacidad mayor de 5, lo que indica que en esas zonas de C/D los vehículos no son capaces de organizarse y una de las bahías no se usará correctamente.

Con esta información se puede hacer una estimación del número de bahías usadas de manera inapropiada y los m² medios de espacio público mal usados durante la hora punta en todo el centro de la ciudad. Además, se ha especificado el espacio usado incorrectamente en los alrededores de las zonas de C/D (Tabla 20):

		Grupos en los que se clasifican las zonas de C/D				
Zona de C/D representativa		Calle Jesús de Monasterio	Calle Vargas	Plaza La Leña	Calle Cervantes	Calle sin ilegalidades
Nº de zonas de C/D pertenecientes al grupo		6	8	7	17	10
Nº de bahías mal usadas debido a las características de las zonas de C/D y la calle		18	8	14	17	0
Espacio medio (m ²) mal usado		172	153	134	163	0
Alrededores de las zonas de C/D usados incorrectamente	M2 medios de carriles	60	0	0	65	0
	M2 medios de acera	0	38	0	0	0
	M2 medios de áreas restringidas	14	0	54	0	0

Tabla 20. M² mal usados en todo el centro de Santander durante la hora punta.

De este análisis, se obtiene una estimación, ya que para tener unos valores más exactos sería necesario analizar todas las zonas de C/D con la misma precisión que las analizadas en este capítulo. De esta estimación obtenemos que un total de 622 m² del centro de la ciudad de Santander están siendo mal usados durante la hora punta de tráfico de mercancías, es decir, están siendo utilizados de manera inadecuada actualmente. Además, se observa que como consecuencia de las características de los alrededores de las zonas de C/D, los m² de uso inapropiado varían. El espacio medio inapropiadamente usado en los carriles de circulación debido a vehículos aparcados en doble fila alcanza los 125m². En cuanto el espacio usado incorrectamente en las aceras se estima que es solamente de 38m². En áreas restringidas puede generar problemas a otros usuarios, como a los autobuses o taxis si estos espacios son paradas de autobús o taxi, a vehículos privados si se trata de salidas de garajes.

En definitiva, sabiendo que las zonas de carga y descarga del centro de Santander ocupan 2.121 m², aproximadamente el 30% del este espacio está siendo usado incorrectamente. Puede que este uso no se directamente en las zonas de C/D y sea

también en sus alrededores, pero ese uso incorrecto es consecuencia del uso de las mismas.

Además, cabe destacar que, aunque la morfología de la calle varíe y la regulación sea muy estricta (situación G), 96 m² seguirán usándose de manera ineficiente debido a que 10 de las zonas de C/D, tienen una capacidad mayor de 5 vehículos de mercancías.

5.1.2. Aplicación del modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga

El modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga ha sido aplicado en el centro de la ciudad de Santander. El centro de la ciudad se ha subdividido en las 29 secciones censales que lo componen, para asegurar que las zonas son lo suficientemente pequeñas para asegurar que un transportista pueda ir andando desde la zona de C/D a su destino final.

PRIMERA ETAPA: ESTIMACIÓN INICIAL DEL NÚMERO DE BAHÍAS DE CARGA

Tal y como se ha expuesto en el capítulo 3, se trata de un modelo de optimización de dos etapas. En la primera etapa se hace una primera estimación del número de bahías de carga haciendo uso de la teoría de colas. Se ha aplicado un modelo M/G/c/∞/FIFO en cada sección censal del centro de Santander durante una hora, la hora punta (09:00 – 10:00 A.M.).

La distribución de llegadas sigue una distribución exponencial, $\text{Exp}(\lambda)$, donde λ es el número medio de llegadas por unidad de tiempo, en este caso en una hora. Este valor cambia para cada zona dependiendo del número total de entregas atraídas durante la hora de estudio. Además, se asume que el tiempo de carga/descarga sigue una distribución normal de media 15 minutos (la mitad del tiempo máximo autorizado) y desviación 5 minutos para todos los tipos de mercancías.

Para la aplicación de la teoría de colas se ha considerado que los transportistas no van a esperar más de 1,2 minutos en cola. Aunque los resultados de las encuestas indican que estarían dispuestos a esperar una media de ocho minutos, de las grabaciones de video detectamos que este tiempo es muchísimo menor, de 1,2 minutos, siendo este valor mucho más restrictivo, es el valor que se ha tomado para realizar las simulaciones. Si un transportista tiene que esperar más tiempo, no lo harían y aparcarían en doble file, en aceras, en zonas restringidas o tomarían otra alternativa como por ejemplo ir a otra zona de C/D.

Con todo ello, se ha aplicado la teoría de colas realizando 50 replicaciones en cada sección censal, obteniendo para cada una de ellas el número de bahías de carga necesarias según la teoría de colas (DB_{QT}) mencionada anteriormente. En la Figura 32 se muestra el número de bahías de carga/descarga en exceso (tonos verdosos) y en defecto (tonos rojizos) comparados con el número actual (DB_C) cuando se ha aplicado la teoría de colas.

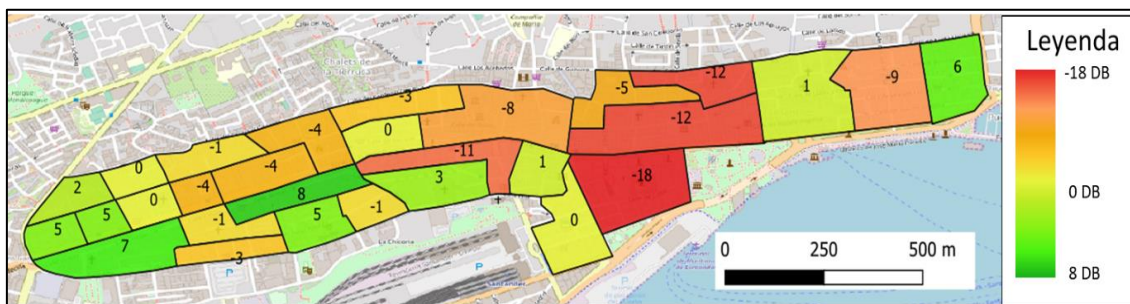


Figura 32. Diferencia entre DB_C y DB_{QT} .

Aunque se ha realizado un estudio específico de las zonas de C/D que están ubicadas en los bordes entre zonas para asegurar que sirven a la sección censal al que están asignados, se observa en que hay secciones limítrofes en los que uno tiene exceso y otro déficit. Un ejemplo de ello se observa en las secciones censales ubicados más al este, uno de ellos tiene un exceso de 6 DB y el contiguo un déficit de 9. Esto se puede deber a una mala distribución espacial de las zonas de C/D.

Cabe mencionar que los resultados de esta primera etapa muestran que hay una zona que tiene un gran déficit de bahías de carga, 18 para ser exactos. Hay más zonas que tienen déficit que las que tienen exceso de bahías (10 de las 29 existentes), siendo la zona que más exceso tiene una de ellas con 8 bahías.

Los resultados obtenidos aplicando la teoría de colas son una primera aproximación, que se utilizarán como dato de entrada en la segunda etapa donde se realizará una simulación más realista para obtener de forma más precisa el número óptimo de bahías de carga y descarga en cada zona.

SEGUNDA ETAPA: VALIDACIÓN DEL NÚMERO DE BAHÍAS DE CARGA

En esta segunda etapa se ha utilizado un programa de eventos discretos (Rockwell Arena) para simular nuevos escenarios con el objetivo de evaluar posibles mejoras y verificar que se alcanzan los resultados esperados.

Se han simulado múltiples escenarios para las 29 zonas, realizando 100 replicaciones para cada uno de ellos hasta alcanzar el escenario óptimo. Tal y como se ha mencionado en el capítulo 3, en el primer escenario de simulación, el número de bahías de carga será igual a:

- El número actual de DB, si $DBQT < DBC$.
- El número de DB obtenido en la primera etapa (DBQT), si $DBQT > DBC$.

En base a los resultados obtenidos en la primera simulación se variarán o no las DB para así obtener el número de bahías de C/D óptimas.

El período de simulación es el período de tiempo en el que las zonas de C/D están habilitadas, que en el caso del centro de la ciudad de Santander es entre las 07:00 – 14:00 h. Una variable a tener en consideración es el tiempo de estacionamiento en la zona de C/D (DT). Basándonos en este modelo, hemos planteado dos alternativas, en la primera de ellas el DT es el actual, el que actualmente utilizan los transportistas. La segunda alternativa es obtener el número de bahías de C/D si no existen ilegalidades en esta variable y los transportistas no exceden el tiempo límite de 30 minutos establecido por el ayuntamiento de Santander. Esta alternativa sería viable si se aplica algún tipo de medida para que esto sea posible.

En la Figura 33 se muestra el esquema planteado en Rockwell Arena para simular los diferentes escenarios. De las simulaciones realizadas se obtienen resultados de

diferentes parámetros: distribución del número de vehículos, distribución del tiempo de espera en cola, el número de vehículos que van a las zonas de C/D sin esperar en cola, el número de vehículos que no van a las zonas de C/D porque el tiempo de espera es elevado (mayor de 1,2 minutos) etc. Con todos estos parámetros, es posible verificar si se han alcanzado o no los objetivos planteados.

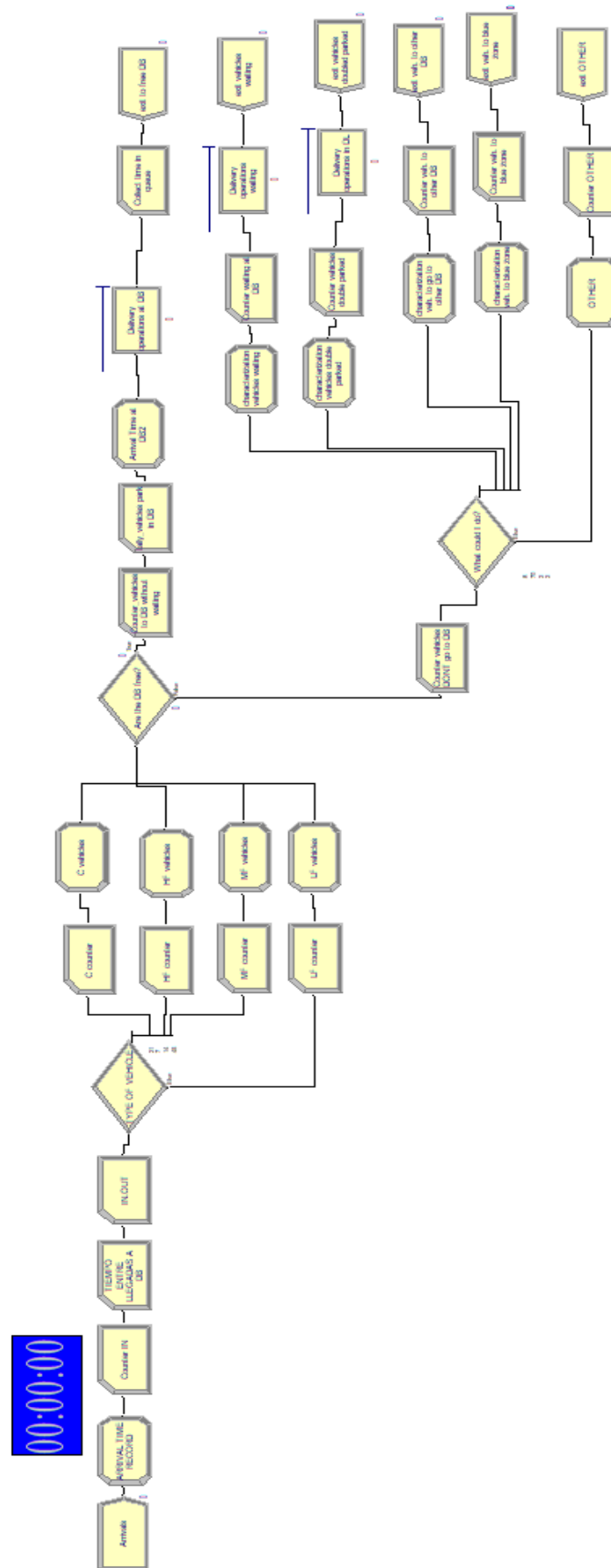


Figura 33. Esquema de la modelación llevada a cabo en Rockwell Arena para el desarrollo del modelo de optimización de numero de bahías de C/D

Como ejemplo se muestran los resultados obtenidos en la sección censal 101. Se presentan en la Tabla 21 los resultados obtenidos tras aplicar el modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga. Se observa que el número de bahías de carga necesarias es mayor que las existentes, tanto con DT actual como con un $DT \leq 30$ min.

	Actual	1º etapa	2º etapa	
			DT actual	DT≤30 min
Número de DB	18	26	35	28
Nº de entregas haciendo uso de DB entre las 7:00-14:00	371			
Nº de FV que van a las DB a realizar sus operaciones	201	243	341	315
Nº de FV que van a las DB a realizar sus operaciones y esperan en cola	66	87	29	55
Nº de FV que aparcan en doble fila, sobre las aceras etc. Porque tiempo de espera es elevado	106	40	0	0,33
Tiempo medio de espera en cola (min)	0,64	1,03	0,7	0,88

Tabla 21. Resultados obtenidos en la sección censal 101.

El número de vehículos de mercancías en cola durante el período de estudio se muestra en la Figura 34 y el tiempo de espera en la Figura 35. Se observa en ambas figuras que como era de esperar el periodo crítico se encuentra entre las 9:30 A.M. y las 10:30 A.M.

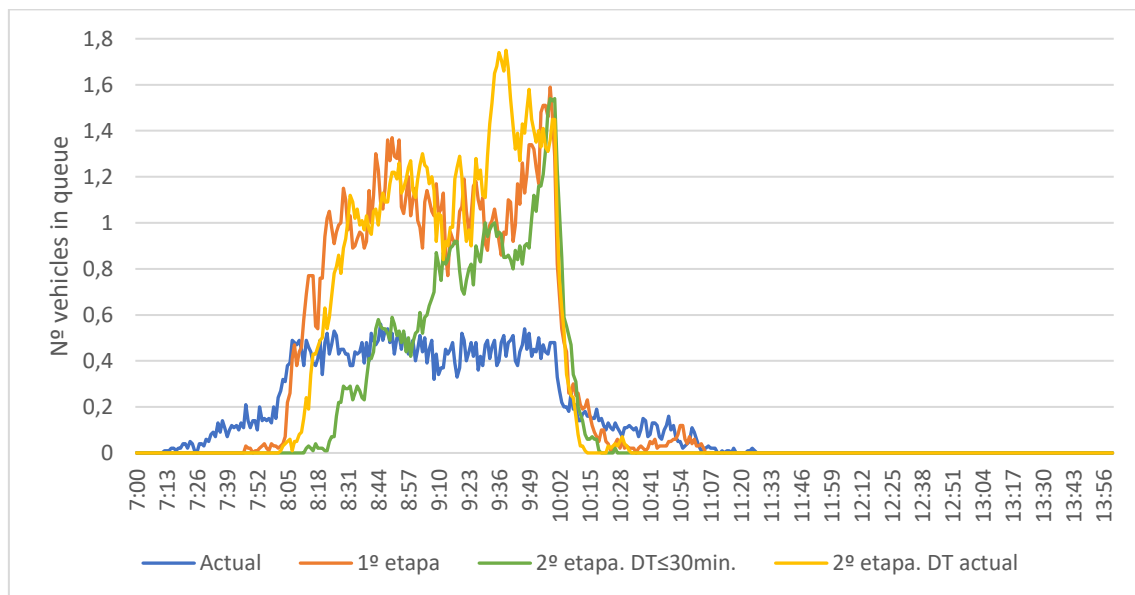


Figura 34. Nº de vehículos en cola en la sección censal 101.

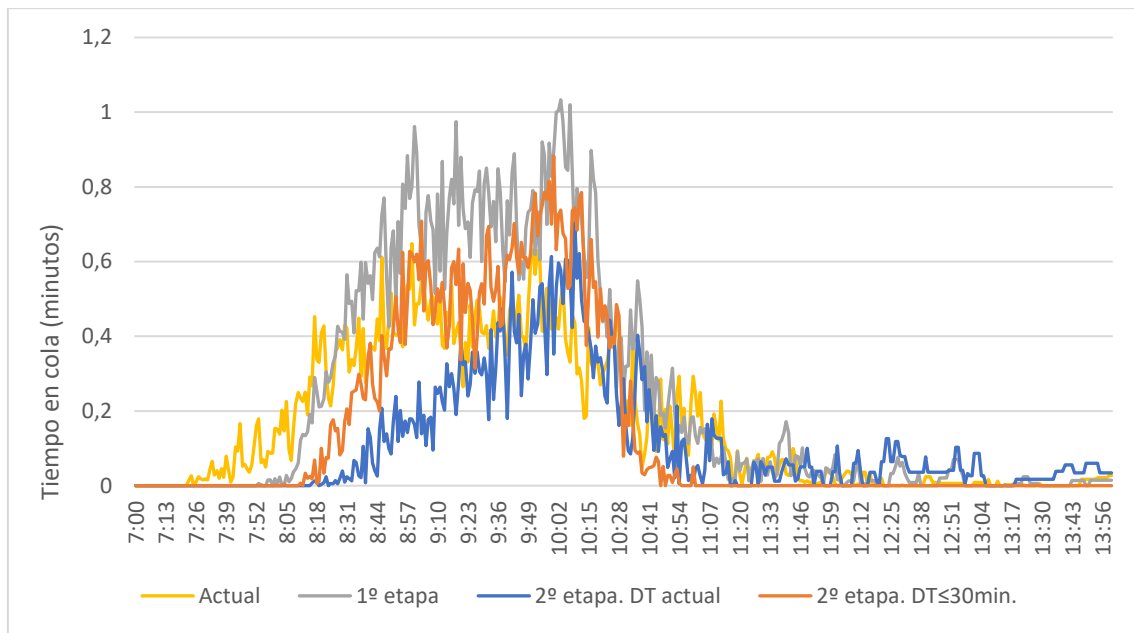


Figura 35. Tiempo de vehículos en cola en la sección censal 101.

El mismo procedimiento se ha llevado a cabo en las 29 secciones censales del área de estudio. En la Tabla 22 se muestran los resultados obtenidos aplicando el modelo de optimización de bahías de carga/descarga en cada sección censal.

Sección censal	N.º actual de DB	N.º de DB de la primera etapa	N.º óptimo de DB con DT actual	N.º óptimo de DB con DT ≤ 30 min.
101	25	26	35	28
102	11	23	30	23
103	6	18	25	19
104	9	14	19	15
107	5	8	11	9
108	3	3	5	5
109	8	19	25	19
110	4	1	3	3
111	4	3	3	3
204	3	7	10	8
205	4	5	7	6
206	4	10	13	10
210	6	4	5	4
211	4	4	6	5
212	10	4	6	5
215	7	7	9	7
225	6	8	11	9
226	5	3	4	3
401	18	17	24	18
402	16	16	22	17
403	14	8	10	8
501	16	34	40	34
502	16	16	22	17
601	16	8	11	10
602	8	5	7	5
603	4	5	7	5
605	18	11	14	12
613	2	3	5	4
614	5	6	8	6
TOTAL	255	306	407	327

Tabla 22. Resultados obtenidos aplicando el modelo de optimización del número de bahías de C/D

En las siguientes figuras se representa gráficamente la diferencia entre el número óptimo de DB cuando el tiempo de C/D es el actual y el número de DB actual (Figura 36) y en la Figura 37 la diferencia entre el número óptimo de DB cuando el tiempo de C/D es el permitido (menor a 30 minutos) y el número de DB actual. Se muestra en cada sección censal el número que lo identifica. Además, se representa en una gama de

colores el número de DB en exceso o déficit que tiene cada una de ellas, siendo los tonos verdes exceso de DB, y las secciones censales con déficit se representan con tonos amarillentos, rojizos, violetas y azul, siendo estos últimos los de mayor déficit.



Figura 36. Diferencia entre el número óptimo de DB cuando el tiempo de C/D es el actual y el número de DB actual

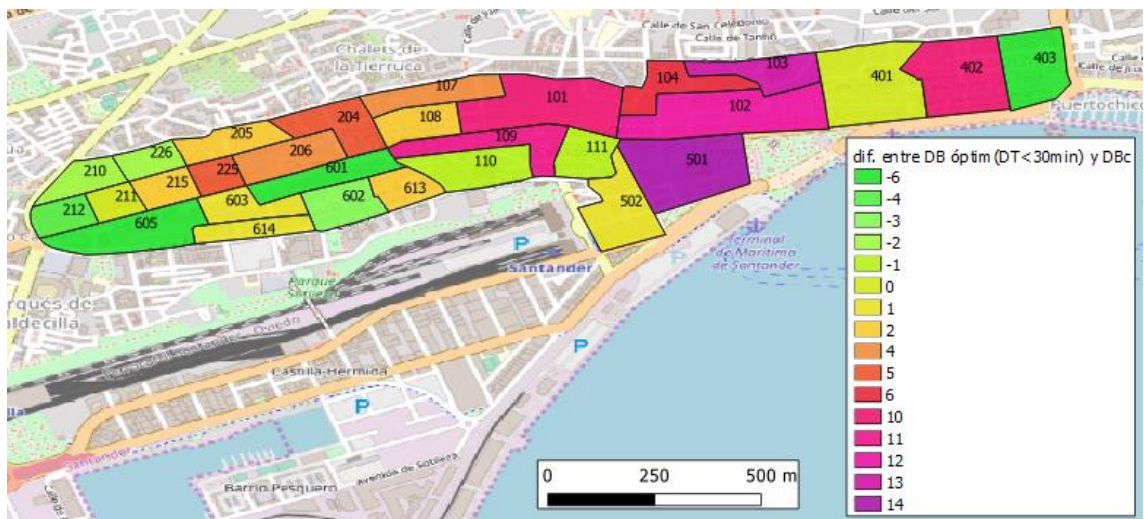


Figura 37. Diferencia entre el número óptimo de DB cuando el tiempo de C/D es el permitido (menor a 30 minutos) y el número de DB actual

Se puede observar, que para ambas situaciones la zona central del centro urbano es la que mayor déficit presenta, y sin embargo las zonas extremas, tanto en el este como en el oeste actualmente tienen un exceso. Además, cabe mencionar que existen secciones

censales limítrofes en los que uno tiene déficit y otro exceso, esto da lugar a replantear la ubicación actual de las zonas de C/D.

La aplicación de este modelo en el centro de la ciudad de Santander se ha llevado a cabo realizando una distinción entre los tipos de vehículos. La cantidad de mercancía transportada es una de las variables principales para determinar el número óptimo de bahías de C/D. Por este motivo, se ha querido representar en la Figura 38 el número de entregas en DB entre las 07:00 - 14:00 h. (eje X) frente al número óptimo de bahías de carga (eje Y). Se ha representado tanto la 1ª etapa (aplicando teoría de colas) como la 2ª etapa, tanto con tiempo de entrega actual como con restricción de tiempo (DT<30min.). Se muestra la línea de tendencia para ambas etapas, pudiendo observar que cuanto menor es el número de entregas, menor es la diferencia en los resultados. Se observa que actualmente el número de DB no sigue ninguna tendencia con respecto al número de entregas que se realizan. Además, se puede observar que el número óptimo de DB si el tiempo de entregas continúa siendo el mismo es mucho mayor que si se implantan medidas para restringir el exceso de tiempo de estacionamiento.

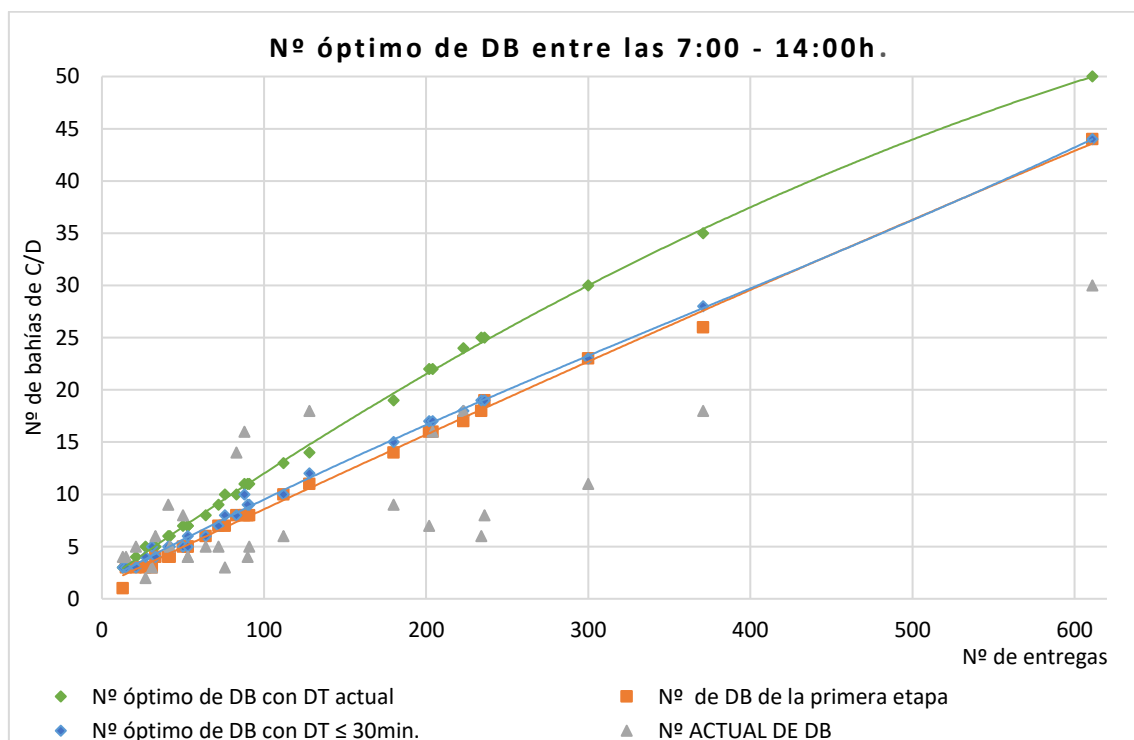


Figura 38. Nº de entregas vs nº óptimo de DB

La Figura 38 permite obtener de manera rápida y directa el número de DB en el centro de Santander. Esto puede ser de aplicación práctica si se producen cambios importantes en la demanda de mercancías, como puede ser la apertura de nuevas tiendas. Para poder aplicar estos resultados, sería necesario estudiar si la distribución de llegadas y la tipología de mercancías ha variado, si no es así obtendríamos el número óptimo de DB muy rápidamente, en caso contrario serviría como una primera aproximación.

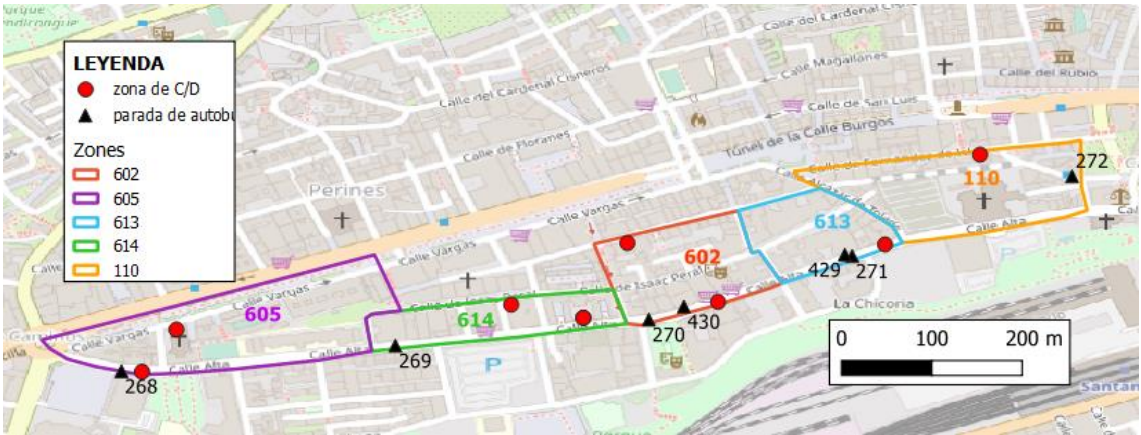
5.1.3. Aplicación del modelo de uso compartido de paradas de autobús urbano

Al igual que los modelos anteriores, el modelo de uso compartido de paradas de autobús se ha aplicado en el centro de la ciudad de Santander entre las 7:00 – 14:00h., es decir, un período de análisis de 7 horas.

Tal y como se ha mencionado en el capítulo 3, para la aplicación de este modelo es necesario que las paradas de autobús cumplan ciertos requisitos:

- Paradas localizadas en zonas con problemas de aparcamiento
- Frecuencia de paso de autobús baja, entendiendo por baja que al menos durante el 50% del período de análisis el intervalo de paso es mayor o igual al tiempo medio de operación de carga y descarga.
- Parada segregada del tráfico general

El modelo se ha evaluado en un área de 0.123km² del centro de Santander. En dicha área hay varias paradas que cumplen dichos requisitos, para ser más exactos 7 paradas ubicadas entre 5 secciones censales. En la Figura 39 se representa la ubicación de las 7 paradas de autobús candidatas a ser de uso compartido y la sección censal en el que se ubican, así como la ubicación de las zonas de C/D. En tres de las secciones censales (605, 614 y 110) únicamente hay una parada de uso compartido, sin embargo, las zonas 602 y 613, disponen de dos.



Se ha querido analizar si existen diferencias notables entre los diferentes escenarios de una misma zona, es decir, si existen diferencias si se usan datos históricos o teóricos de paso de autobús. En la Tabla 23 se muestran los resultados obtenidos en la simulación de la zona 605. Se puede observar que los resultados son muy similares si se usan datos históricos, sin diferencia notable entre los diferentes días de la semana. Sin embargo, usando datos teóricos se obtienen resultados ligeramente menores.

	TEÓRICOS	HISTÓRICOS				
		lunes	martes	miércoles	jueves	viernes
Nº medio de FV en BS	41,26	46,6	46,7	45,84	46,76	46,42
Nº máx. de FV en BS	49	56	56	56	57	56
Nº mín. de FV en BS	29	38	39	38	38	35
%de tiempo que estaría ocupada con BS	64%	76%	75%	74%	75%	76%

Tabla 23. Comparativa entre datos teóricos y datos reales en días laborables en la zona 605

En el resto de las zonas, los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en la Tabla 23, en lo que se refiere a diferencia entre datos teóricos e históricos, lo cual confirma que existen desviaciones en los pasos por parada de autobús con respecto a lo programado.

En la tabla 24 se muestran los resultados obtenidos aplicando el modelo descrito con datos históricos de paso por parada de autobús (media de una semana) en las 7 paradas de autobús de uso compartido. Se hace uso de datos históricos con el objetivo de obtener los resultados que se obtendrían en una situación en la que existe una parada de autobús de uso compartido.

Sección censal	605	614	602		613		110
Demanda FV (nº FV/período de estudio)	128	64	50		27		13
Código de las paradas de autobús	268	269	270	430	271	429	272
Longitud de BS (m)	17,3	19,5	22,3	17,2	11,5	17,3	10
Capacidad de BS para FV (FV)	2	3	3	2	1	2	1
Nº medio de FV que usan BS en laborable	46,4	31,2	31,5		16,5		5,7
% de FV que usan BS laborable	36,3%	48,6%	62,9%		62,3%		44,5%
% de FV que usan BS sábado	39,5%	57,5%	57,7%		71,3%		52,9%

tabla 24. Características y resultados obtenidos en las 7 paradas de autobús de uso compartido.

Además, en la Figura 41 se muestra de manera gráfica los resultados obtenidos de la aplicación del modelo. Se muestra la ocupación media (50 replicaciones) de la BS 268 ubicada en la zona 605 a lo largo del período de estudio (7.00-14.00 h), tanto para días laborables como para los sábados. Se podría aplicar también en domingos y festivos, pero los transportes de mercancías no tienen permitido circular en esos días. Se puede observar que aproximadamente la ocupación es similar, habiendo una pequeña desviación el miércoles. Esto se debe a que el autobús urbano llega a la parada varios minutos más tarde que el resto de los días. En cuanto a la ocupación media en sábados, se observa que en general es superior a los días laborables, y esto es debido a que el intervalo de paso de autobús es mayor y por lo tanto los vehículos de mercancías tienen más tiempo para realizar sus actividades de carga/descarga.

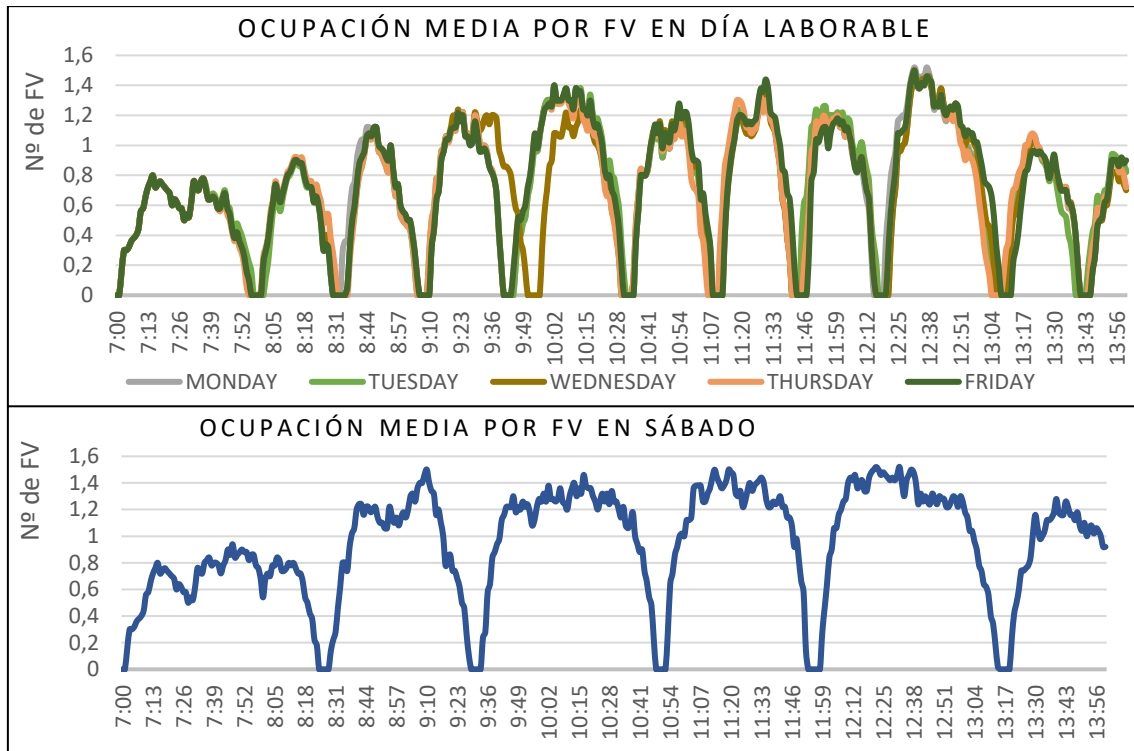


Figura 41. Ocupación media de la parada de autobús de uso compartida 268 por FV

En la Figura 42 se representa la ocupación media (50 replicaciones) de la parada de autobús (BS) 268 ubicada en la zona 605 en la situación actual en la que es usada únicamente por autobuses urbanos, y la ocupación media si la parada de autobús fuese de uso compartido, en la que es utilizada tanto por vehículos de mercancías como autobuses. Comparando ambas gráficas podemos observar que la ocupación media aumenta de manera muy significativa cuando la parada de autobús es de uso compartido.

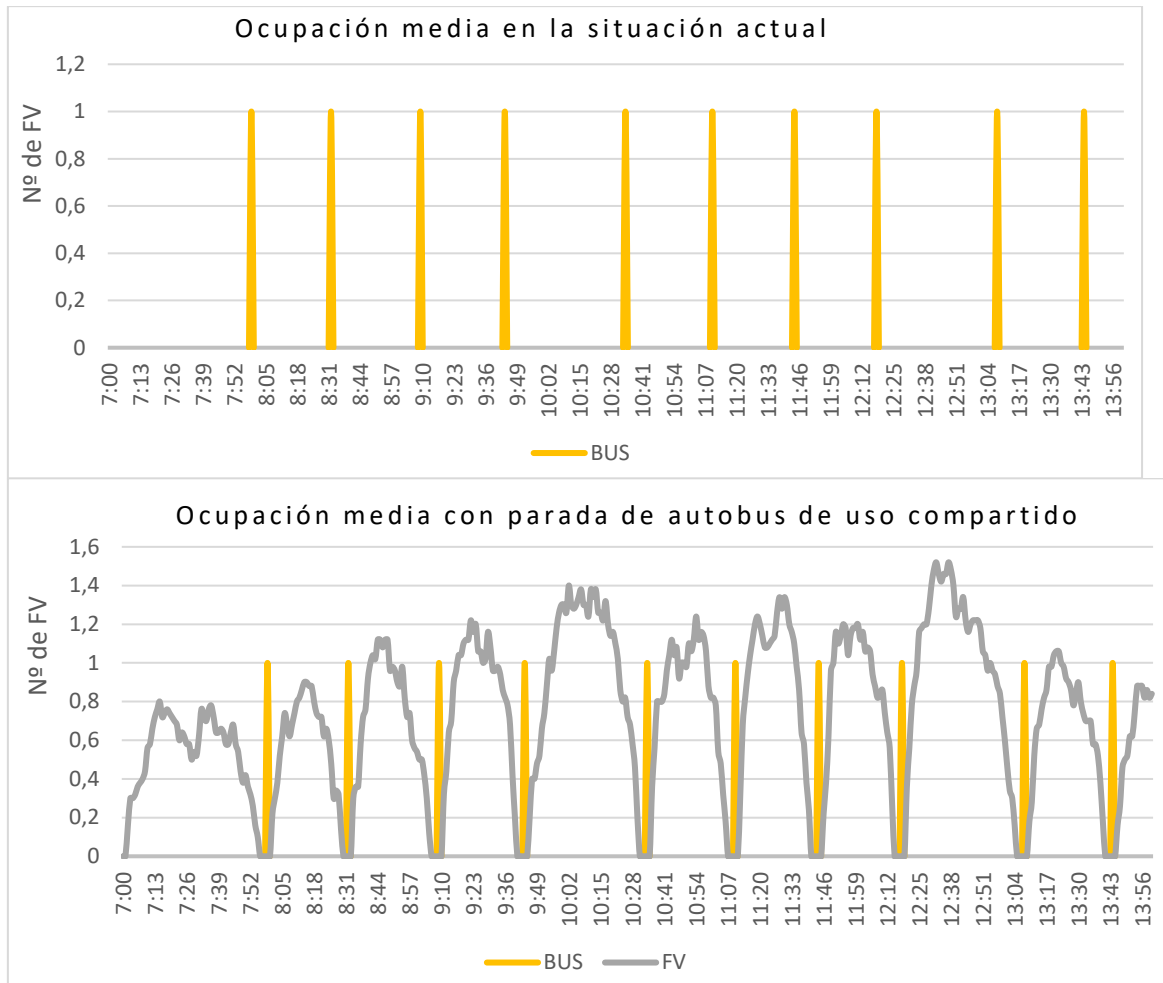


Figura 42. Ocupación media de la BS 268 en la situación actual vs parada de autobús de uso compartido en un día laborable

La información mostrada en la anterior figura (Figura 42) se muestra en Tabla 25 añadiendo también el resto de las paradas del área de estudio. Se muestran los resultados tanto para días laborables como para sábados, así como el porcentaje de tiempo medio que la BS está actualmente ocupada, y lo que estaría si fuera de uso compartido.

Sección censal		605	614	602	613	110
Laborable	% de tiempo que está ocupada actualmente	2,4%	2,4%	4,6%	4,7%	2,4%
	% de tiempo que estaría ocupada con BS	75,1%	48,7%	59,4%	32,2%	10,7%
	% dif. situación actual y con BS	72,8%	46,3%	54,8%	27,4%	8,4%
Sábado	% de tiempo que está ocupada actualmente	1,2%	1,2%	2,1%	2,1%	1,2%
	% de tiempo que estaría ocupada con BS	96,3%	67,6%	56,2%	39,6%	12,8%
	% dif. situación actual y con BS	95,1%	66,4%	54,1%	37,4%	11,6%

Tabla 25. Resultados de ocupación obtenidos tras aplicar el modelo de uso compartido de paradas de autobús.

Si se compara el % de tiempo que está ocupada actualmente la parada de autobús con el porcentaje de tiempo que estaría ocupada si la parada de bus fuera de uso compartido se obtienen resultados que merece la pena destacar. La diferencia máxima se da en la zona 605 que llega a ser hasta del 72.8 % en días laborables y del 96.3 % en sábados. Esta es la zona en la que más se aprovecha la zona de C/D con mucha diferencia, pero esto se debe a que la demanda de vehículos de mercancías también es mayor que en el resto de las zonas. En el otro extremo se sitúa la zona 110 en la que solo existe una diferencia del 8.4% en laborables y 11.6% en sábados. Como se ha mencionado antes esto se debe a que la demanda de vehículos de mercancías es también menor, de 13 vehículos de mercancías durante el período de análisis. Sin embargo, lo que si queda claro es que en cualquiera de los casos se maximiza el uso de las paradas de bus de uso compartido, ya sea en mayor o menor medida.

Una vez aplicado el modelo de uso compartido de las paradas de autobús en estas zonas, es necesaria la Aplicación del modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga, ya que ahora las condiciones de dichas zonas han cambiado y el espacio disponible para que los vehículos de mercancía realicen sus operaciones no es únicamente las zonas de carga y descarga como hasta ahora, sino también las paradas de autobús de uso compartido. Si aplicamos dicho modelo en las cinco secciones

censales en los que hay paradas de autobús de uso compartido se obtienen los siguientes resultados (Tabla 26):

Sección censal	605	614	602	613	110
nº óptimo de DB sin BS	14	8	7	5	4
nº óptimo de DB con BS	9	7	4	4	3
Dif.entre nº óptimo de DB con y sin BS	5	1	3	1	1
% de DB que se disminuyen	36%	13%	43%	20%	25%

Tabla 26. Resultados obtenidos de la aplicación del modelo de optimización de bahías de C/D en las secciones censales en los que se ha aplicado el modelo de uso compartido de paradas de autobús.

Se puede observar que, como consecuencia del uso de las paradas de autobús de uso compartido, el número óptimo de bahías de C/D es menor en todas las zonas, llegando en la zona 605 a disminuir un 36%. En total, en toda el área de estudio, 11 de las bahías de C/D actuales podrían ser utilizadas para otro fin. Esas 11 bahías de C/D suponen aproximadamente 127.6 m² (considerando que una bahía de C/D tiene una superficie de 5.8 x 2 m²).

El modelo se ha aplicado en una zona de Santander en la que la frecuencia de paso de autobús es en casi todo el período de estudio de 2 autobuses/hora. Sin embargo, este modelo puede aplicarse en zonas de otras ciudades en las que la frecuencia de paso del autobús es diferente, o en las que la demanda de mercancías también lo es. Por este motivo se ha analizado el uso de las paradas de autobús de uso compartido en la zona de estudio para diferentes frecuencias de paso de autobús. En la siguiente figura (Figura 43) se muestra los resultados obtenidos de la simulación llevada a cabo en la parada de autobús compartida 268. Se representa la ocupación media de la parada de autobús si la frecuencia aumenta o disminuye con respecto a frecuencia actual en días laborables.

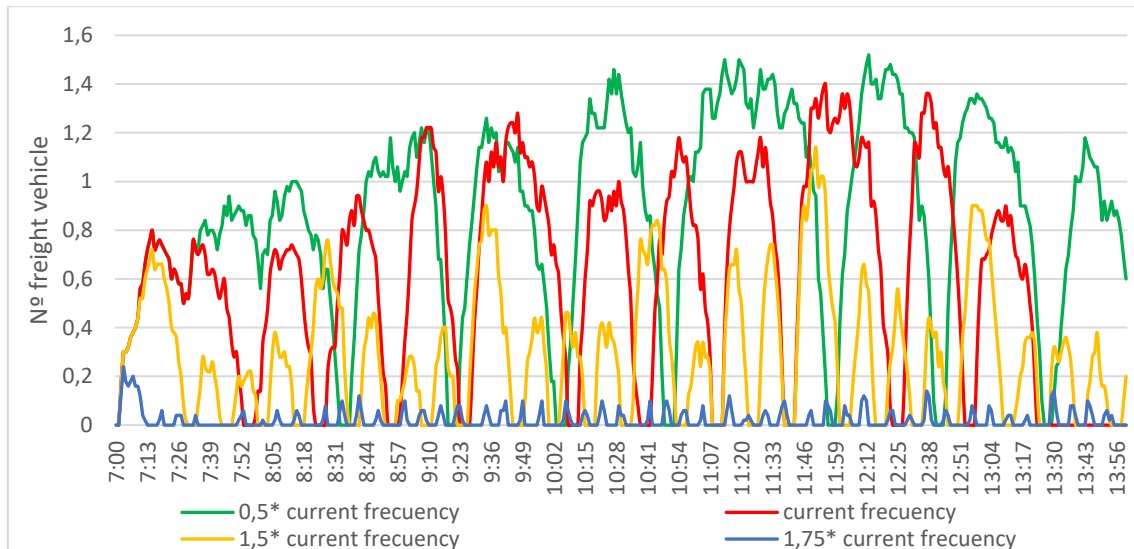


Figura 43. Ocupación media de la BS 268 (zona 605) por vehículos de mercancías para líneas de autobús con diferentes frecuencias.

Como era de esperar se observa que, si la frecuencia aumenta, el uso de la parada de autobús por vehículos de mercancías disminuye. Si la frecuencia aumenta un 50% ($1.5 \times$ frecuencia actual) la parada de autobús compartida apenas es usada por vehículos de mercancías por lo que la aplicación del modelo no es útil.

Este análisis se ha llevado a cabo en todas las áreas, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 44. Se muestra el número de vehículos de mercancías que usan las paradas de autobús con la frecuencia actual, así como con mayores y menores frecuencias. La tendencia no es exactamente la misma en todas las zonas ya que la demanda tampoco es la misma, así como el tipo de vehículos de mercancía que realizan operaciones de carga en dichas zonas. Si analizamos los resultados obtenidos podemos observar que para la aplicación de este modelo es necesario analizar no solo la frecuencia de paso de autobuses sino también el tipo de demanda de vehículos de mercancías, ya que el tiempo de entrega tiene una influencia importante en el éxito del modelo. De cualquier modo, cuanto menor sea la frecuencia de autobuses más efectivo es el modelo.

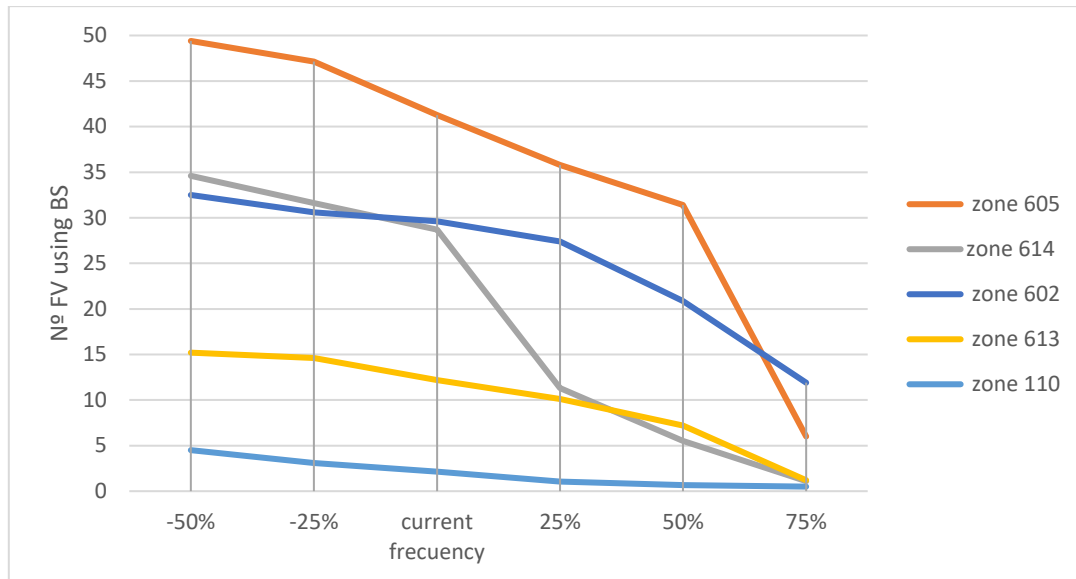


Figura 44. Nº de vehículos de mercancías usando paradas de autobús desde las 7.00 a las 14.00h vs variaciones en la frecuencia de paso de autobús

5.2. Aplicación del modelo de optimización de vehículos de mercancía de gran dimensión

El modelo de optimización de vehículos de mercancías de gran dimensión presentado en el capítulo 3 ha sido aplicado a un proyecto de construcción real de la ciudad de Santander. En dicho proyecto la infraestructura a construir estaba localizada en el este de la ciudad, y además de generar congestión de tráfico por su propia ubicación requería transportar de 180 metros cúbicos de material de construcción durante la hora punta. En base a lo anterior el modelo determinará la capacidad, tamaño y ruta que deben realizar los camiones de gran dimensión para minimizar los costes económicos, sociales y ambientales.

El material de construcción será transportado mediante una flota de vehículos homogénea, la cual será seleccionada entre varias tipologías caracterizadas por su capacidad y su velocidad máxima (Tabla 27).

Tamaño del camión	Capacidad (ton.)	Velocidad máxima (km/h)
Ligero	9	20
Medio	12	15
Pesado	18	10

Tabla 27. Tipología de vehículos de mercancía de gran dimensión

Partiendo del modelo de red de la ciudad de Santander, se han considerado 3 posibles rutas, las cuales vienen definidas por las restricciones de espacio y radios de giro requeridos para este tipo de vehículos (Figura 45). La primera ruta (R1) consta de calles con dos carriles por sentido a excepción de 800 metros de túnel donde la ruta finaliza. La segunda ruta (R2) se diferencia únicamente de la ruta 1 en que en lugar de ir por el túnel bordea la ciudad por la costa por una calle de un carril por sentido. La ruta 3 (R3) está compuesta por calles que tienen dos o tres carriles por sentido, siendo algunas de ellas las calles con más congestión de la ciudad. Cada una de las rutas tiene una parte urbana (dentro de la ciudad) y una parte externa (desde la cantera hasta las afueras de la ciudad).

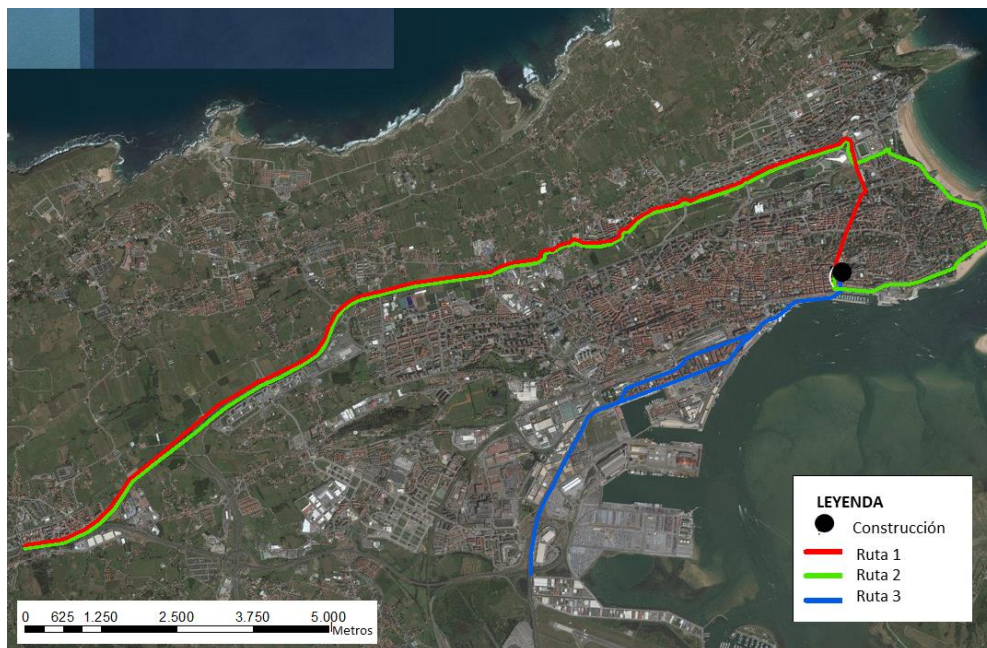


Figura 45. Posibles rutas a elegir en Santander en el modelo de optimización de vehículos de gran dimensión

En primer lugar, se verificará el comportamiento del modelo, estudiando todas las combinaciones posibles de trasladar la flota de vehículos desde la cantera hasta el sitio de construcción, a través de las tres rutas previamente definidas. La flota de vehículos puede ser de diferentes tipologías, tal y como se ha comentado anteriormente (Tabla 27); y además, se han considerado tres tamaños de flota diferentes: 10, 15 o 20 vehículos. Como resultado de la aplicación del modelo se obtienen los costes totales medios, suma de los costes de operación (C_{op}), costes de usuario (C_u) y costes medioambientales (C_{ma}) para cada escenario en términos monetarios.

En nuestro caso de estudio, en el que en la obra de construcción es necesario transportar 180 metros cúbicos durante la hora punta, para cada tipología de vehículo, las soluciones que suponen unos costes menores son las indicadas en la Figura 46. Se representan los costes totales medios para las diferentes combinaciones de tipología y tamaño de la flota; indicando el coste total medio de cada combinación, así como el coste total máximo y mínimo. Además, se muestra la ruta que debieran realizar cada vehículo para obtener los costes medios para cada combinación

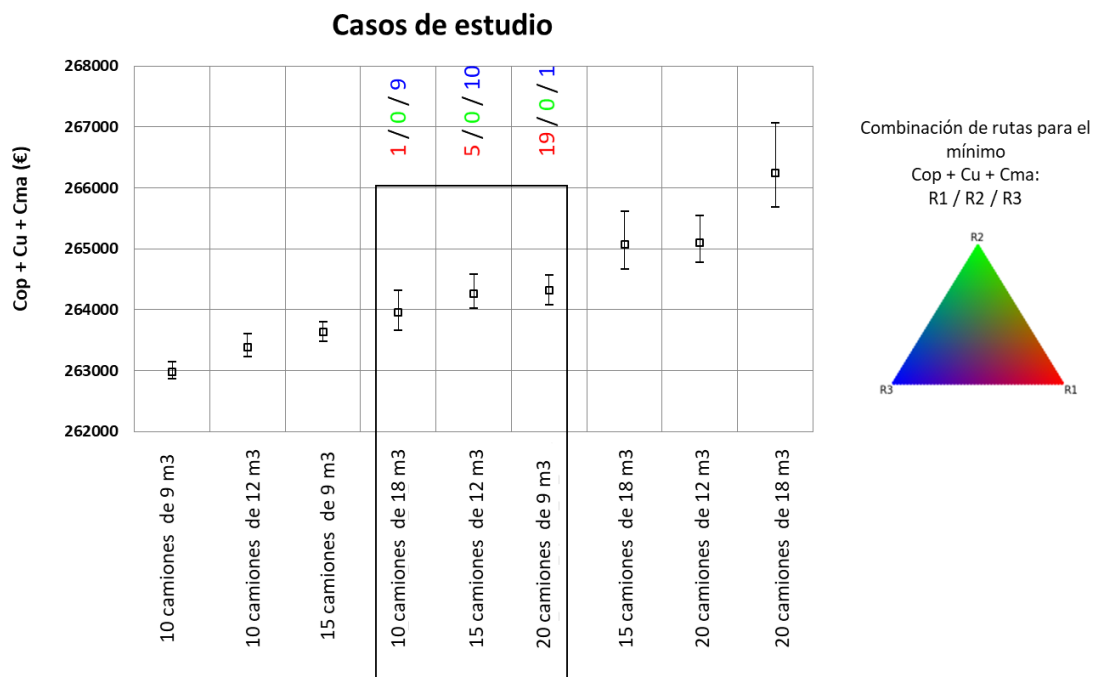


Figura 46. Costes totales medios para el caso de estudio

En la Figura 47 se han representado con más detalle cuáles son esas tres posibilidades, y el número de vehículos que van por cada una de las rutas para el coste medio. Se puede observar que las mejores soluciones, tanto en términos de costes combinados de usuario y operador como en costes ambientales, corresponde a los escenarios en los que la mayor parte de la flota se desplaza por la ruta 1 (puntos rojos). Además, se puede observar que para cada escenario, si la mayor parte de la flota va por la ruta 3 (R3) (puntos azules) los costes ambientales son mayores que si van por las rutas 1 y/o 2, mientras que el uso de la ruta 2 (puntos verdes) por la mayor parte de la flota da lugar a mayores costes combinados de operación y usuario.

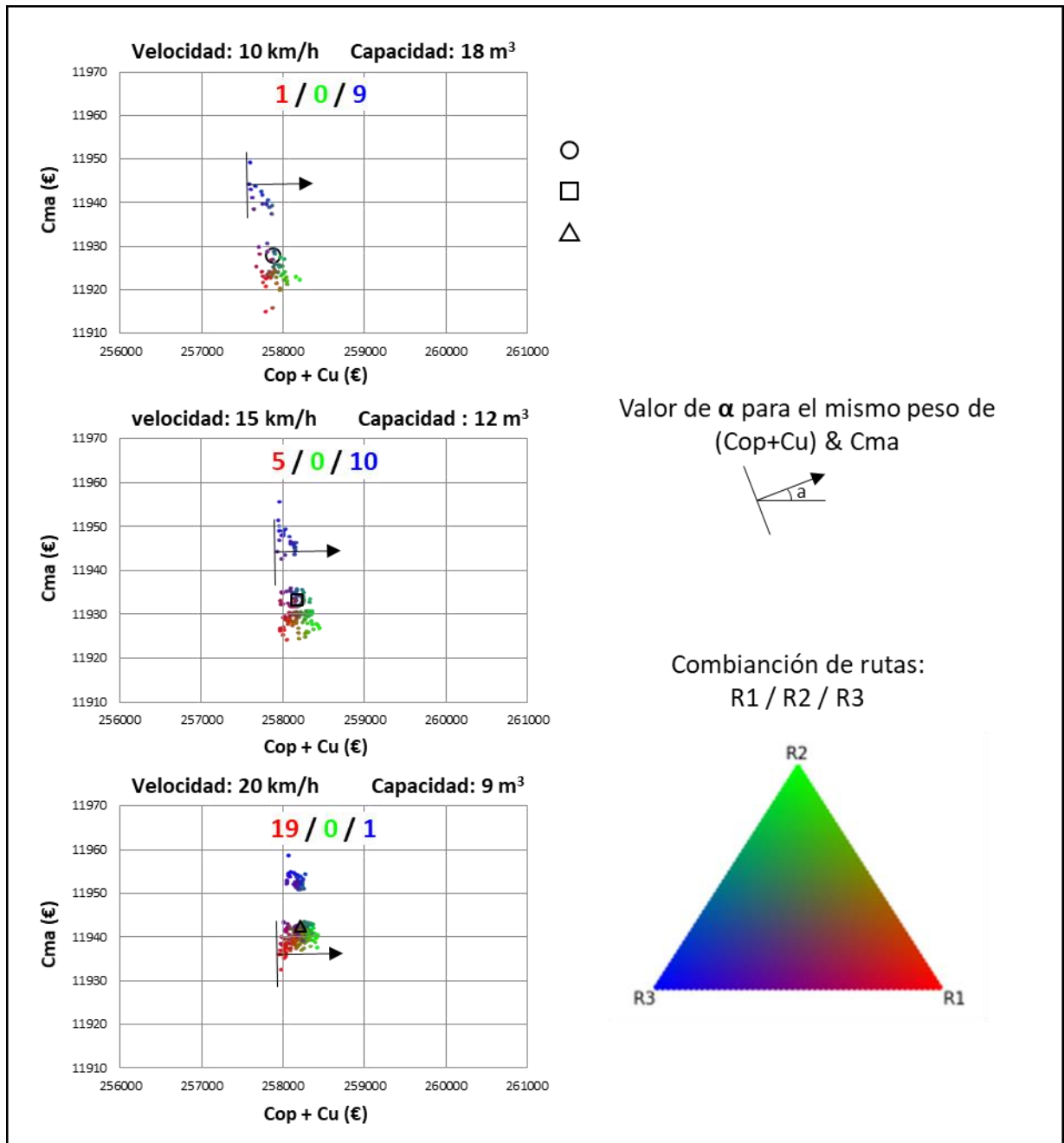


Figura 47. Posibles opciones para transportar la carga

Si el planificador necesita una solución que minimice los costes medioambientales, debería buscar una solución que se mueva por una línea paralela al eje X ($\alpha=90^\circ$), comenzando por $Cma = 0$, y elegir la primera solución que toque dicha línea, la cual corresponde con enviar 10 camiones pesados por la ruta R1. Si el objetivo del planificador es minimizar $Cop+Cu$, el proceso es similar, pero usando una línea paralela al eje Y ($\alpha=0^\circ$). En ese caso, se utilizarán 10 camiones pesados circulando por la ruta R3. Si únicamente hay disponibles camiones medianos o ligeros, para minimizar $Cop + Cu$ la

mayoría de la flota debería ir por la ruta R3 o R1 respectivamente. Otras soluciones intermedias de Pareto se pueden obtener con diferentes énfasis en los costes medioambientales o costes de usuario y de operador. Para ello se debe usar diferentes valores de α entre 0° y 90°.

La Figura 47 muestra el ángulo α que se debiera usar si Cma y Cop +Cu tuviesen la misma importancia. A continuación, se muestran para las tres tipologías de vehículos (pesado, medio and ligero) los costes mínimos, medios y máximos, necesarios para mover el material de construcción desde la cantera hasta la obra, así como el número de camiones que irían por cada una de las tres rutas disponibles.

- Flota de 10 camiones pesados:
 - Coste mínimo: 263.661,08 € (R1/R2/R3: 1/0/9)
 - Coste medio: 263.956,73 €
 - Coste máximo: 264.325,87 € (R1/R2/R3: 0/10/0)
 - Diferencia entre los costes máximos y mínimos: 664,79 €
- Flota de 15 camiones medios:
 - Coste mínimo: 264.027,50 € (R1/R2/R3: 5/0/10)
 - Coste medio: 264.267,95 €
 - Coste máximo: 264.582,49 € (R1/R2/R3: 0/15/0)
 - Diferencia entre los costes máximos y mínimos: 554,91 €
- Flota de 20 camiones ligeros:
 - Coste mínimo: 264.081,94 € (R1/R2/R3: 19/0/1)
 - Coste medio: 264.315,18 €
 - Coste máximo: 264.570,07 € (R1/R2/R3: 0/19/1)
 - Diferencia entre los costes máximos y mínimos: 488,12 €

En cuanto a los costes totales se puede ver que usando una flota de 10 vehículos pesados el coste es significativamente menor (tanto coste mínimo, como promedio y máximo). Hay una pequeña diferencia entre usar una flota de 15 camiones medianos y/o 20 camiones ligeros, en el primer caso es más económico que el segundo en términos de costes mínimos y medios, mientras que es ligeramente más caro cuando consideramos los costes máximos. En conclusión, si la flota de 10 camiones pesados está disponible, es la opción menos costosa desde el punto de vista medioambiental, económico y social.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas de investigación futuras

Esta tesis propone mejoras al transporte urbano de mercancías para así paliar los problemas existentes actualmente en este ámbito. Para ello es necesario realizar una exhaustiva revisión de la literatura con el fin de identificar las medidas y metodologías desarrolladas e investigadas para mejorar el transporte de mercancías en ámbito urbano, e identificar posibles áreas de interés que no han sido suficientemente estudiadas y generan impactos importantes en las ciudades. En la presente tesis doctoral se proponen y aplican una serie de modelos para hacer el transporte urbano de mercancías más eficiente y minimizar ciertos impactos negativos que produce esta actividad.

En concreto se proponen un primer conjunto de modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga, como es una metodología para analizar el uso de las zonas de carga y descarga, un modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga y un modelo de uso compartido de paradas de autobús urbano en el que el espacio es compartido entre autobuses urbanos y vehículos de mercancías. Por otro lado, también se propone, un modelo de optimización de vehículos de mercancías de gran dimensión que circulan hacia el interior de las áreas urbanas congestionadas, desde el punto de vista social, económico y ambiental. Para ello se definen las rutas, así como el número y tipo de vehículo de gran dimensión necesarios para transportar la carga.

La investigación contribuye a la práctica científica y al conocimiento con estos nuevos modelos. Asimismo, la aplicación de dichos modelos a un caso real ha permitido verificar

la bondad y precisión de tales herramientas, alcanzando alguno de los objetivos propuestos en la presente tesis:

- Estudiar y modelizar el comportamiento de uso de las zonas de carga y descarga, analizando tanto sus características como las de los vehículos y conductores que hacen uso de las mismas.
- Optimizar el espacio urbano dedicado a las operaciones de carga y descarga de los vehículos de mercancías.
- Optimizar desde un punto de vista económico, social y medioambiental el transporte de mercancías de gran dimensión en áreas urbanas congestionadas.

En este capítulo se recogen las principales conclusiones obtenidas de la presente tesis doctoral, así como una propuesta de futuras líneas de investigación que permitan avanzar en el desarrollo del estado del conocimiento.

6.1. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones más importantes obtenidas en el desarrollo de esta tesis relativas a: los modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga; y al modelo de optimización de vehículos de mercancías de gran dimensión en áreas urbanas congestionadas.

6.1.1. Conclusiones de los modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga

A continuación, se presentan las conclusiones más importantes obtenidas de los modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga.

En primer lugar, la metodología de análisis de uso de las zonas de carga y descarga parte de la base de un análisis exhaustivo de sus características y las de sus alrededores, así como del uso que se hace de las mismas. Partiendo de este análisis, la metodología

propone diferentes escenarios de simulación con diferentes regulaciones. De esta manera se reproducen las consecuencias del uso ilegal de las zonas de carga y descarga y su implicación en el uso eficiente del espacio.

Esta metodología puede ser aplicada en cualquier ciudad de tamaño medio, y en el caso de Santander, ha sido aplicada en cuatro zonas de carga y descarga del centro de Santander, las cuales son una muestra representativa del centro de la ciudad. De la aplicación de esta metodología se ha obtenido que el grado de ilegalidad es muy elevado, entre el 58% y el 44% de los vehículos que van a las zonas de C/D realizan algún tipo de uso ilegal, ya sea porque es usada por vehículos que no pueden usarlas como por ejemplo los coches, o porque el tiempo de estacionamiento supera el límite establecido. Como consecuencia de las ilegalidades que se producen en las zonas de carga y descarga, se producen otras en sus inmediaciones, como son aparcar en doble fila, sobre las aceras o en áreas de estacionamiento restringido. Estas ilegalidades suponen entre el 34% y el 55% de los vehículos que van a las zonas de C/D o sus inmediaciones. Por otro lado, en cuando a la estimación cuantitativa del uso inapropiado de las zonas de C/D, se observa que las ilegalidades debidas a la superación del tiempo de estacionamiento establecido tienen un impacto mayor que el uso ilegal por la tipología de vehículo (teniendo en cuenta que el porcentaje de ilegalidad es parecido).

Además, de la aplicación de esta metodología se han obtenido conclusiones que pueden ayudar a definir la capacidad de las zonas de carga y descarga y sus características en cualquier ciudad de tamaño medio:

- Cuanto mayor es la capacidad de la zona de C/D su uso es menos eficiente. Esto se debe a que cuanto mayor es la capacidad los vehículos tienen menos habilidad para ordenarse en las propias zonas.
- En cuanto a las características de las zonas de C/D, se ha llegado a la conclusión de que las características en el entorno de la zona de C/D influye en el uso que se hace de la misma. Las conclusiones obtenidas proporcionan recomendaciones y estrategias a seguir en las ciudades para el diseño de las zonas de carga/descarga:

- La capacidad de una zona de C/D debe ser como mucho de 5 bahías.
- Hay que evitar zonas de C/D sin elementos físicos en la zona posterior y anterior de la misma. Además, si es necesario la colocación de elementos físicos para proteger mobiliario urbano, como pueden ser contenedores de basura, se recomienda el uso de losas de hormigón en lugar de bolardos u otro elemento. Esto se debe a que las losas de hormigón permiten la apertura de puertas traseras para realizar la descarga o carga en los vehículos, y el uso de la zona de C/D puede ser más eficiente en la parte delantera ya que el vehículo puede estar sobre la propia losa (espacio entre el inicio del vehículo y las ruedas).

Otras de las recomendaciones van encaminadas a las regulaciones de las zonas de C/D:

- Las autoridades deberían implementar medidas de control, pero no solo para controlar el tipo de vehículo que hace uso de las mimas, sino también para controlar el tiempo de estacionamiento con el objetivo de promover la rotación de vehículos. Los resultados obtenidos muestran que en aquellos escenarios en los que el tiempo de estacionamiento es el permitido, los impactos negativos sobre el uso del suelo disminuyen notablemente.
- Es recomendable ser estrictos con las regulaciones implementadas para que el uso inapropiado del espacio público urbano se reduzca tanto en las zonas de C/D como en sus alrededores.

Otro de los modelos desarrollados para optimizar el espacio usado para realizar operaciones de carga y descarga es el modelo de optimización del número de bahías de C/D. El objetivo de este modelo es obtener el número óptimo de bahías de C/D con el objetivo de que los transportistas dispongan de una bahía libre al llegar a una zona de carga y descarga o en su defecto un tiempo de espera en cola reducido. Este modelo se desarrolla en dos etapas, en la primera de ellas se obtiene una primera estimación del número de bahías necesarias haciendo uso de la teoría de colas. Esta primera estimación se utilizará en la segunda etapa, en la que se obtendrá el número óptimo de bahías de C/D considerando la variabilidad y aleatoriedad de variables como la llegada de

vehículos a las zonas de carga y descarga o los tiempos de entrega. Para ello se hace uso de un simulador de eventos discretos (Rockwell Arena).

Este modelo puede aplicarse a cualquier área urbana para determinar si el número de bahías de C/D es el óptimo, y si no lo fuera definir cual debiera ser. Si el número óptimo de bahías de C/D es mayor al actual, será necesario aumentar estos espacios; en caso contrario, si el número óptimo es menor, se podría recuperar espacio urbano muy valioso y destinarlo a otros usos como pueden ser aparcamientos para bicicletas, motos o coches, espacios para mobiliario urbano como contenedores de basura o para incrementar el espacio destinado al peatón como las aceras. Además, este modelo sirve para diseñar el número de zonas de C/D óptimo en zonas en las que este tipo de áreas reservadas todavía no existen. Asimismo, se ha obtenido el número óptimo en dos situaciones: una en la que el tiempo de entrega (DT) es el actual, y otra en la que existe una regulación de esta variable y los tiempos de entrega no exceden el tiempo permitido.

En el caso de estudio en el que este modelo se ha aplicado, Santander, se observa que el diseño del número de bahías de C/D no es el óptimo, ya que hay zonas con déficit y con exceso, tanto en la situación actual como en la situación hipotética en la que existe una rigurosa regulación de los tiempos de estacionamiento.

Las ciudades están en continua transformación por múltiples motivos, algunos de índole tecnológico y otros inesperados pero que generan enormes impactos en el comportamiento de nuestras actividades y por ende en las del transporte de mercancías de ámbito urbano (un ejemplo de ello es el actual COVID-19). Este modelo sirve de guía para que los responsables de realizar el diseño y la gestión de las zonas de C/D puedan hacerlo de una manera rápida y ágil. El modelo es versátil y se adapta a aplicaciones de carácter dinámico (necesidad de definir diariamente la dimensión de las zonas de carga y descarga en función de información previa de los transportistas). Por otro lado, ante un futuro escenario de mayor número de entregas domiciliarias debido al crecimiento del comercio electrónico el modelo es válido, requiriendo únicamente definir como datos de entrada la demanda de mercancías por sección censal.

El último de los modelos es el modelo de uso compartido de las paradas de autobús urbano como zonas de carga y descarga. Este modelo analiza el uso compartido de las paradas de autobús, entre autobuses urbanos y vehículos de mercancías, con el objetivo de maximizar el uso de las mismas, y como consecuencia la eficiencia en el uso del espacio público de las ciudades. En este modelo los autobuses urbanos tienen un uso preferente mientras que los vehículos de mercancías los utilizan cuando los autobuses no lo están haciendo.

Los resultados obtenidos de la aplicación de este modelo en la ciudad de Santander muestran un gran aumento en el uso de las paradas de autobús en las que el modelo se ha aplicado. Este aumento llega a alcanzar el 72.8% del uso actual durante el período de tiempo analizado. El porcentaje de vehículos de mercancías que harían uso de las paradas de autobús varían entre un 36.3% y un 62.9%. Como consecuencia del uso de las paradas de autobús compartidas, las bahías de carga y descarga que estos vehículos utilizan actualmente en el entorno de esas paradas, pueden destinarse a otros usos como pueden ser aparcamientos para bicicletas motos o coches o para contenedores de basura o para mobiliario urbano o ampliar las aceras.

Además, el análisis realizado sobre el uso de las paradas de autobús compartidas para diferentes demandas de mercancías (tanto en número de vehículos como en tiempo de estacionamiento) y para diferentes frecuencias de paso de autobús, muestran que ambas variables tienen un impacto significativo en los beneficios de este modelo. Cuanto menor sea la frecuencia de paso y mayor sea la demanda de mercancías, mayores serán los beneficios del modelo. Además, para zonas con poca demanda de mercancías, la disminución en la frecuencia de autobuses no ofrece tantos beneficios como cuando la zona tiene una gran demanda de mercancías.

En resumen, los modelos de optimización del espacio utilizado para realizar operaciones de carga y descarga aportan recomendaciones y directrices para un diseño óptimo de las zonas de carga y descarga, así como un uso más racional de valioso espacio público tan escaso en las áreas urbanas.

6.1.2. Conclusiones del modelo de optimización de vehículos de mercancías de gran dimensión

El modelo de optimización de vehículos de gran dimensión es un modelo que minimiza el impacto de los vehículos de mercancías de gran dimensión que vienen de fuera de la ciudad hasta un punto específico del centro de la misma. El modelo se basa en una programación matemática bi-nivel que permite que las decisiones del planificador afecten al resto de usuarios del sistema (usuarios de vehículo privado y de transporte público, así como al resto de vehículos de mercancías), permitiendo simular el sistema completo de una forma realista. Por otro lado, el modelo permite incorporar distintos criterios a la hora de definir la función objetivo del problema, incorporando criterios económicos, sociales y medioambientales.

La aplicación del modelo en el caso de Santander se ha realizado para definir un sistema completo de transporte de materiales de construcción a un punto específico de la ciudad (obra de infraestructura). Este punto de recepción de material se caracteriza por ser una zona de alta movilidad tanto de transporte público como de privado.

Los vehículos de mercancía pueden ser de diferentes tipologías, y estos se asignan a diferentes rutas con diferentes frecuencias para así minimizar los costes totales del sistema. En definitiva, el modelo proporciona soluciones para diferentes tipologías de vehículos de mercancías por diferentes rutas. La solución más económica desde el punto de vista de costes de usuario, de operación y medioambientales es utilizar 10 vehículos de mercancías pesados, utilizando uno de ellos la ruta R1 y los otros 9 vehículos la ruta R3. Sin embargo, si el objetivo es encontrar la mejor solución desde el punto de vista medioambiental, entonces los 10 vehículos de mercancías pesados deberían usar la ruta R1. Pero, si solo hubiera disponibles vehículos con capacidad de 9 toneladas, entonces la mejor solución medioambiental es asignar 15 vehículos a la ruta R1 y 5 a la ruta R3; y en el caso de costes totales la mejor solución sería asignar 10 vehículos a la ruta R1, 9 a la ruta R2 y 1 vehículo a la ruta R3.

En definitiva, la conclusión más importante que obtenemos de este modelo es que gestionar y planificar los desplazamientos de vehículos de gran dimensión reduce el impacto social, medioambiental y/o económico de las ciudades. La movilidad de este

tipo de vehículos puede considerarse puntual en comparación con el resto de los vehículos que circula por las ciudades, sin embargo, eso no implica que la reducción de sus enormes impactos no sea importante. La aplicación de este modelo presenta reducciones importantes basándose en la selección del tipo de vehículo y las rutas más adecuadas a los objetivos que se quieran alcanzar.

6.2. Líneas de investigación futuras

A partir de la investigación desarrollada y de los resultados obtenidos en esta tesis, quedan diferentes líneas de investigación abiertas para un futuro desarrollo:

- Una validación de los modelos obtenidos considerando datos de diferentes ciudades con otras características y usos.
- Estudio sobre la influencia de las ilegalidades producidas en torno a las zonas de carga y descarga en el tráfico que circula por la ciudad, y en la calidad de la movilidad de los peatones.
- Ampliación del modelo de optimización del número de bahías de carga y descarga para mejorar la definición de la localización óptima de las zonas de carga y descarga.
- Desarrollo de un estudio de gestión dinámica de reserva de espacios, tanto de zonas de carga y descarga como de paradas de autobús de uso compartido en las ciudades inteligentes.
- Contribuir en las investigaciones que se están desarrollando en el campo de los vehículos de mercancías autónomos.

Chapter 6

Conclusions and future developments

This doctoral thesis suggests urban freight improvements to mitigate the current problems in this field. To this end is necessary to perform a comprehensive literature review in order to identify the measures and methodologies developed and researched to improve urban freight transport, and to identify possible areas of interest that have not been studied extensively enough and cause significant impacts on the cities. On this doctoral thesis several models have been proposed and applied to make urban freight transport more efficient and to minimize negative impacts produced by this activity.

A first set of models that optimize the space used by carriers to perform loading and unloading activities have been proposed. One of them is a methodology to analyse the use of loading and unloading zones, another is a model to optimize the number of loading and unloading (L/U) bays and the third one is the shared bus stop use model in which the space is shared between buses and freight vehicles. Furthermore, an optimization model for large freight vehicles that circulate to congested urban areas has been also suggested. This model has been evaluated from a social, economic and environmental point of view. To this end, the routes, as well as the number and type of large freight vehicles necessary to transport the load, have been defined.

This research contributes to scientific practice and knowledge with these new models. Likewise, the application of these models to a real case has allowed to verify the goodness and precision of such tools, achieving some of the objectives proposed in this thesis:

- Study and model the use of loading and unloading zones, analysing the characteristics of both freight vehicles and carriers.
- Optimise urban space dedicated to loading and unloading activity by freight vehicles.
- Optimise from an economic, social and environmental point of view transportation in congested urban areas when large freight vehicles need to be utilized.

In this chapter the main conclusions obtained from this doctoral thesis are collected, as well as a proposal for future lines of research that will advance the development of the state of knowledge.

6.1. Conclusions

The most important findings obtained in the development of this thesis are presented below: those related to the models that optimize the space used to perform loading and unloading activities; and those derived from the optimization model for large freight vehicles in congested urban areas.

6.1.1. Conclusions of the models that optimize the space used by carriers to perform loading and unloading activities

The most important conclusions obtained from the models that optimize the space used to perform loading and unloading activities are detailed below.

Firstly, the methodology to analyse the use of loading and unloading zones is based on a comprehensive analysis of their use and characteristics. On the basis of this analysis, the methodology proposes different simulation scenarios with different regulations.

This way, the consequences of the illegalities in loading and unloading zones and their implication in the efficient use of the space has been reproduced.

This methodology can be applied in any medium-size city, and in the case of Santander, has been applied in four loading and unloading (L/U) zones in the city centre. Those zones are a representative sample of the city centre. From the application of this methodology, it has been observed that the rate of illegal behaviour is very high: between 44% and 58% of the vehicles that use L/U zones make some type of unlawful use, either because they are not allowed to use it (for example, cars), or because the parking time exceeds the established limit. As a consequence of the illegalities that occur in L/U zones, others occur in their vicinity such as double parking, park on the sidewalks or in restricted parking areas. These illegalities represent between 34% and 55% of the vehicles that go to the L/U zones or their surroundings. Furthermore, regarding the quantitative quantification of inappropriate use of L/U zones, it is observed that illegalities due to exceeding the parking time limit have a greater impact than illegal use due to the type of vehicle (taking into account that both show up with similar frequency).

In addition, from the application of this methodology some conclusions that can help to define the capacity and characteristics of L/U zones in any medium city have been obtained:

- The greater the capacity of the L/U zone is, the less efficient its use becomes. This is because higher capacities mean freight vehicles have less ability to self-organize in the L/U zones.
- Regarding to the L/U zone characteristics, it has been concluded that the characteristics of the L/U zone vicinity influence their utilization. The conclusions obtained provide recommendations and strategies to follow in cities to design L/U zones:
 - The capacity of a L/U zone should be at most five delivery bays.
 - Avoid L/U zones without physic elements in the back and front of it. Furthermore, if the placement of physical elements is necessary to protect urban furniture, such as garbage containers, it is recommended the use of concrete slabs instead of bollards or another element. This is

because concrete slabs allow the back doors to be opened to loading and unloading, and in the front of the vehicle the use of the L/U zone can be more efficient because the front of the vehicle can be on the slab itself (space between the beginning of the vehicle and the wheels).

Other recommendations are aimed at the regulations of the L/U zones:

- Authorities should implement control measurements, but not only to control the type of vehicle that use them, but also to control the parking time in order to promote vehicle rotation. The results obtained show that in those scenarios in which the allotted parking time is respected, the negative impacts on the use of public space decrease significantly.
- It is recommended to be strict with the implemented regulations, so the inappropriate use of public space is reduced both in and around L/U zones.

Another model developed to optimize the space used to make loading and unloading activities is the model to optimize the number of delivery bays. Its objective is to obtain the optimal number of L/U bays needed to provide a free bay to carriers when they arrive at a L/U zone or, failing that, a reduced queuing time. This is a two-stage model, in the first stage an initial estimation of the number of L/U bays is obtained using queue theory. This first estimation it will be used in the second stage, in which the optimal number of L/U bays will be obtained considering the variability and randomness of some variables such as vehicles arrival to loading and unloading zones or delivery time. To this end, a discrete event simulator has been used (Rockwell Arena).

This model is applicable in any urban area to determine if the number of L/U bays is the optimal, and if not, to define what it should be. If the optimal number of L/U bays is greater than the current number, these spaces should be increased; otherwise, if the optimal number is less, very valuable urban space could be recovered for other uses such as parking lots for bicycles, motorcycles or cars; spaces for urban furniture such as garbage containers or to increase the space for pedestrians like the sidewalks. Furthermore, this model can be used to design the optimal number of L/U bays in those zones in which this type of reserved spaces does not yet exist. Additionally, the optimal number has been obtained in two situations, one with the current delivery time (DT),

and other situation in which there is a regulation of this variable and the carriers do not exceed the allowed delivery time.

In the case of study in which this model has been applied, Santander, it has been observed that the design of the number of L/U bays is not the optimal, since there are zones with deficit and others with excess, both in the current situation and in the hypothetical situation in which a strict regulation of the parking times is implemented.

Cities are in continuous transformation for multiple reasons, some of technological nature and others unexpected. They generate enormous impacts on the behaviour of our activities and therefore on those of urban freight transport (an example of this is the current COVID-19). This model serves as a guide to those responsible for carrying out the design and management of L/U zones so they can do it quickly and agilely. The model is versatile, and it adapts to dynamic applications (which need to define the size of the loading and unloading zones on a daily basis based on prior information from the carriers). Furthermore, in a future scenario of more home deliveries due to the growth of electronic commerce, the model is valid, requiring only as input data the freight demand per census section.

The last model described is the shared use model, which considers that bus stops can also serve as loading and unloading zones. This model analyses the shared bus stop use between urban buses and freight vehicles, with the aim of maximizing their utilization, and as consequence the efficiency of the use of public spaces in cities. In this model urban buses are still given preference, but freight transport vehicles will be allowed to use these areas while they are not needed by the public transport vehicles.

The results obtained from the application of the model in Santander shows a great increase in the use of bus stops in which the model has been applied. This increase reaches 72.8% of the current use during the analysis period. The percentage of freight vehicles that would use bus stops varies between 36.3% and 62.9%. As a consequence of the shared bus stops use, loading and unloading bays that freight vehicles currently use on the surroundings of these bus stops can be destined to other uses, such as parking lots for bicycle, motorbike or cars; garbage containers; urban furniture or widen sidewalks.

Additionally, the analysis developed on the shared bus stop use for different freight demands (both in number of freight vehicles and in parking time) and for different bus lines frequencies, shows that both variables have a significant impact on the benefits of the model. The lower the frequency of the bus lines and the greater the freight demand is, the greater benefits of the model are. Furthermore, for low freight demand areas, the decrease in bus frequency does not offer as many benefits as when the area has a high freight demand.

In summary, the models that optimize the space used by carriers to perform loading and unloading activities provide recommendations and guidelines to an optimal design of the loading and loading zones, and to a rational use of the valuable public space, which is so scarce in urban areas.

6.1.2. Conclusions of the optimization model for large freight vehicles in congested urban areas

The optimization model for large freight vehicles in congested urban areas minimizes the impact of large freight vehicles coming from outside of the city to a specific point in the city centre. The model is based on a on bilevel mathematical programming that allows the planner's decisions to affect the other users of the system (users of private and public transport vehicles, as well as others freight vehicles). The model allows the complete system to be simulated in a realistic way. Furthermore, in the model different criteria can be incorporated to the objective function of the problem; incorporating economic, social and environmental criteria.

The application of the model in the case of Santander has been carried out to define a complete system for transporting construction materials to a specific point in the city (infrastructure work). This material reception point is characterized by being a high mobility area for both public and private transport.

Large freight vehicles can be of different types, and these are assigned to different routes with different frequencies in order to minimise the total cost of the system. In short, the model provides solutions for different types of freight vehicles on different routes. The most economical solution from the user, operational and environmental cost point of view is to use 10 large freight vehicles. One of them using route R1 and the others 9 vehicles route R3. However, if the objective is to find the best solution from environmental point of view, then 10

large freight vehicles should use route R1. But, if we would only have vehicles with a capacity of 9 tons available, then the best environmental solution is to assign 15 vehicles to route R1 and 5 vehicles to route R3. In the case of total cost, the best solution will be to assign 10 vehicles to route R1, 9 to route R2 and 1 to route R1.

The most important solution obtained from this model is that managing and planning the movement of large freight vehicles reduces their social, environmental or/and economic impact in the city. The mobility of this type of vehicles can be considered punctual compared to the rest of the vehicles that circulate in cities. However, this does not imply that reducing its enormous impacts is not important. The application of this model present important reductions base on the selection of the type of vehicles and the best routes to achieve the proposed objectives.

6.2. Future developments

From the research developed and the results obtained in this doctoral thesis, different lines of research remain open for future development:

- Validation of the proposed models considering input data from different cities with other characteristics and uses.
- Study the influence of the illegalities produced around the loading and unloading zones on the traffic that circulates through the city, and on the quality of pedestrian mobility.
- An extension of the model developed to optimize the number of loading and unloading bays, in order to improve the definition of the L/U bays optimal location.
- Develop a study of dynamic management of delivery bays booking in smart cities, for both dedicated L/U zones and shared bus stops.
- Contribute to the research that is being developed in the field of autonomous freight vehicles.

Referencias

- Adams, M., Cryan, S., Mourelatou, A., & Nytorv, K. (2009). Air emission inventory data in europe: new perspectives.
- Aiura, N., & Taniguchi, E. (2005). Planning on-street loading-unloading spaces considering the behaviour of pickup-delivery vehicles. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 2963-2974.
- Akyol, D. E., & De Koster, R. B. (2018). Determining time windows in urban freight transport: A city cooperative approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 118, 34-50.
- Alho, A. R., & e Silva, J. d. A. (2014). Analyzing the relation between land-use/urban freight operations and the need for dedicated infrastructure/enforcement—Application to the city of Lisbon. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 85-97.
- Alho, A. R., e Silva, J. d. A., de Sousa, J. P., & Blanco, E. (2018). Improving mobility by optimizing the number, location and usage of loading/unloading bays for urban freight vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.
- Allen, J., Browne, M., Woodburn, A., & Leonardi, J. (2012). The role of urban consolidation centres in sustainable freight transport. *Transport Reviews*, 32(4), 473-490.
- Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M., McLeod, F., Cherrett, T., Ghali, K., Nguyen, T., Bektas, T., Bates, O., & Friday, A. (2018). Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: The case of London. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 325-338.
- Almaz, O. A., & Altiok, T. (2012). Simulation modeling of the vessel traffic in Delaware River: Impact of deepening on port performance. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 22, 146-165.

- Alvarez, P., Lerga, I., Serrano-Hernandez, A., & Faulin, J. (2018). The impact of traffic congestion when optimising delivery routes in real time. A case study in Spain. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 21(5), 529-541.
- Anderson, S., Allen, J., & Browne, M. (2005). Urban logistics—how can it meet policy makers' sustainability objectives? *Journal of transport geography*, 13(1), 71-81.
- Antolín, G., Ibeas, Á., Alonso, B., & dell'Olio, L. (2018). Modelling parking behaviour considering users heterogeneities. *Transport Policy*, 67, 23-30.
- Arvidsson, N. (2013). The milk run revisited: A load factor paradox with economic and environmental implications for urban freight transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 51, 56-62.
- Bandeira, R. A., D'Agosto, M. A., Ribeiro, S. K., Bandeira, A. P., & Goes, G. V. (2018). A fuzzy multi-criteria model for evaluating sustainable urban freight transportation operations. *Journal of cleaner production*, 184, 727-739.
- Barcelona, A. d. (2007). Plan especial del comercio no alimentario de Barcelona (PECNAB).
- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232-1250.
- BESTFACT. (2013a). i-Ladezone: Intelligent monitoring of loading bays in Vienna. *European Commission, Seventh framework Programme*,
- BESTFACT. (2013b). Multiuse lanes for freight distribution in Bilbao. *European Commission, Seventh framework Programme*
- Browne, M., Allen, J., & Attlassy, M. (2007). Comparing freight transport strategies and measures in London and Paris. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 10(3), 205-219.
- Browne, M., Allen, J., & Leonardi, J. (2011). Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London. *IATSS research*, 35(1), 1-6.

- Cairns, S., Sloman, L., Newson, C., Anable, J., Kirkbride, A., & Goodwin, P. (2004). Smarter choices-changing the way we travel. *Final report of the research project: 'The influence of soft factor interventions on travel demand'*.
- CEOE. (2017). Distribución urbana de mercancías. *Confederación española de organizaciones empresariales (CEOE). Departamento de Asuntos Económicos y Europeos*.
- Cheng, G., Zhao, S., & Zhang, T. (2019). A Bi-Level Programming Model for Optimal Bus Stop Spacing of a Bus Rapid Transit System. *Mathematics*, 7(7), 625.
- Cherrett, T., Allen, J., McLeod, F., Maynard, S., Hickford, A., & Browne, M. (2012). Understanding urban freight activity – key issues for freight planning. *Journal of Transport Geography*, 24, 22-32.
- CITET. (2017). Estudio de viabilidad para el desarrollo de soluciones logísticas. Definición operativa de la distribución urbana de mercancías de la ciudad de Madrid. Foro de empresas por Madrid.
- Collins, A. T. (2015). Behavioural influences on the environmental impact of collection/delivery points. In *Green logistics and transportation* (pp. 15-34). Springer.
- Comi, A. (2018). Smart urban freight transport: tools for planning and optimising delivery operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*.
- Comi, A., Buttarazzi, B., Schiraldi, M. M., Innarella, R., Varisco, M., & Rosati, L. (2017). DynaLOAD: a simulation framework for planning, managing and controlling urban delivery bays. *Transportation Research Procedia*, 22, 335-344.
- Comi, A., Delle Site, P., Filippi, F., Marcucci, E., & Nuzzolo, A. (2008). Differentiated regulation of urban freight traffic: conceptual framework and examples from Italy. Proceedings of 13th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies,

- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2004). Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(2), 119-137.
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for evaluating and planning city logistics systems [Article]. *Transportation Science*, 43(4), 432-454.
- Dablanc, L. (2007). Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize [Article]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(3), 280-285.
- Daganzo, C. F., & Pilachowski, J. (2011). Reducing bunching with bus-to-bus cooperation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(1), 267-277.
- Dalla Chiara, G., & Cheah, L. (2017). Data stories from urban loading bays. *European Transport Research Review*, 9(4), 50.
- Danielis, R., Rotaris, L., & Marcucci, E. (2010). Urban freight policies and distribution channels: a discussion based on evidence from Italian cities.
- De Marco, A., Mangano, G., & Zenezini, G. (2018). Classification and benchmark of City Logistics measures: an empirical analysis. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 21(1), 1-19.
- De Oliveira, L. K., & Guerra, E. D. (2014). A diagnosis methodology for urban goods distribution: A case study in Belo Horizonte City (Brazil). *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 125, 199-211.
- Dell'Olio, L., Moura, J. L., Ibeas, A., Cordera, R., & Holguin-Veras, J. (2017). Receivers' willingness-to-adopt novel urban goods distribution practices. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 102, 130-141.
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3), 775-793.

- Dente, S. M., & Tavasszy, L. (2018). Policy oriented emission factors for road freight transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 33-41.
- Dezi, G., Dondi, G., & Sangiorgi, C. (2010). Urban freight transport in Bologna: Planning commercial vehicle loading/unloading zones. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 5990-6001.
- Domínguez, A., Holguín-Veras, J., Ibeas, Á., & dell'Olio, L. (2012). Receivers' response to new urban freight policies. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 886-896.
- Edwards, J., McKinnon, A., Cherrett, T., McLeod, F., & Song, L. (2010). Carbon Dioxide Benefits of Using Collection–Delivery Points for Failed Home Deliveries in the United Kingdom. *Transportation Research Record*, 2191(1), 136-143.
- EEA. (2019). European Environment agency . Emissions of air pollutants from transport.
- Ehmke, J. F., Campbell, A. M., & Thomas, B. W. (2016). Vehicle routing to minimize time-dependent emissions in urban areas. *European Journal of Operational Research*, 251(2), 478-494.
- Ellison, R. B., Greaves, S. P., & Hensher, D. A. (2013). Five years of London's low emission zone: Effects on vehicle fleet composition and air quality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, 25-33.
- Erlang, A. K. (1909). The theory of probabilities and telephone conversations. *Nyt. Tidsskr. Mat. Ser. B*, 20, 33-39.
- España. Orden PCI/810/2018, de 27 de julio, por la que se modifican los anexos II, XI y XVIII del Reglamento General de Vehículos, aprobado por Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre.
- Fernández-López, D., Montemayor, A. S., Pantrigo, J. J., Delgado, M. L., & Cabido, R. (2013). Onboard Vision System for Bus Lane Monitoring. International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation,

- Filippi, F., Nuzzolo, A., Comi, A., & Delle Site, P. (2010). Ex-ante assessment of urban freight transport policies. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6332-6342.
- Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2005). A review of green logistics schemes used in cities around the world.
- Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanellander, T. (2011). Characteristics and typology of last-mile logistics from an innovation perspective in an urban context. *City Distribution and Urban Freight Transport: Multiple Perspectives*, Edward Elgar Publishing, 56-71.
- Ghilas, V., Demir, E., & Van Woensel, T. (2013). Integrating passenger and freight transportation: model formulation and insights. In.
- Ghilas, V., Demir, E., & Van Woensel, T. (2016). An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Scheduled Lines. *Computers & Operations Research*, 72, 12-30.
- Guo, J., Wang, X., Fan, S., & Gen, M. (2017). Forward and reverse logistics network and route planning under the environment of low-carbon emissions: A case study of Shanghai fresh food E-commerce enterprises. *Computers & Industrial Engineering*, 106, 351-360.
- Gutjahr, W. J., & Dzubur, N. (2016). Bi-objective bilevel optimization of distribution center locations considering user equilibria. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 85, 1-22.
- Hai, D., Xu, J., Duan, Z., & Chen, C. (2020). Effects of underground logistics system on urban freight traffic: A case study in Shanghai, China. *Journal of Cleaner Production*, 121019.
- Holguin-Veras, J., & Thorson, E. (2000). Trip length distributions in commodity-based and trip-based freight demand modeling: investigation of relationships. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1707), 37-48.

- Holguín-Veras, J., Ozbay, K., Kornhauser, A., Brom, M., Iyer, S., Yushimito, W., Ukkusuri, S., Allen, B., & Silas, M. (2011). Overall impacts of off-hour delivery programs in New York City Metropolitan Area. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2238), 68-76.
- Holguín-Veras, J., Silas, M., Polimeni, J., & Cruz, B. (2008). An investigation on the effectiveness of joint receiver-carrier policies to increase truck traffic in the off-peak hours. *Networks and Spatial Economics*, 8(4), 327-354.
- Holman, C., Harrison, R., & Querol, X. (2015). Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities. *Atmospheric Environment*, 111, 161-169.
- Hsu, C.-I., Hung, S.-F., & Li, H.-C. (2007). Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 465-475.
- Hu, L., & Ni, Q. (2018). IoT-driven automated object detection algorithm for urban surveillance systems in Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 747-754.
- Ibeas, A., Moura, J. L., Nuzzolo, A., & Comi, A. (2012). Urban freight transport demand: transferability of survey results analysis and models. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 1068-1079.
- Iwan, S., Kijewska, K., Johansen, B. G., Eidhammer, O., Małeck, K., Konicki, W., & Thompson, R. G. (2018). Analysis of the environmental impacts of unloading bays based on cellular automata simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 104-117.
- Janjevic, M., & Winkenbach, M. (2020). Characterizing urban last-mile distribution strategies in mature and emerging e-commerce markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 133, 164-196.
- Kamrani, M., Abadi, S. M. H. E., & Golroudbary, S. R. (2014). Traffic simulation of two adjacent unsignalized T-junctions during rush hours using Arena software. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 49, 167-179.

- Kendall, D. G. (1953). Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chain. *The Annals of Mathematical Statistics*, 338-354.
- Kikuta, J., Ito, T., Tomiyama, I., Yamamoto, S., & Yamada, T. (2012). New Subway-Integrated City Logistics Szsystem. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 476-489.
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199-205.
- Letnik, T., Farina, A., Mencinger, M., Lupi, M., & Božičnik, S. (2018). Dynamic Management of Loading Bays for Energy Efficient Urban Freight Deliveries. *Energy*.
- Letnik, T., Mencinger, M., & Bozicnik, S. (2018). Dynamic Management of Urban Last-Mile Deliveries. *City Logistics 2: Modeling and Planning Initiatives*, 23-37.
- LEY 19/2001. (2001). de 19 de diciembre, de reforma del texto articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, aprobado por Real Decreto legislativo 339/1990, de 2 de marzo.
- Lopez, C., Zhao, C.-L., Magniol, S., Chiabaut, N., & Leclercq, L. (2019). Microscopic simulation of cruising for parking of trucks as a measure to manage Freight Loading Zone. *Sustainability*, 11(5), 1276.
- Masek, J., Camaj, J., & Nedeliakova, E. (2015). Application the queuing theory in the warehouse optimization. *Int. J. Soc. Behav. Educ. Econ. Bus. Ind. Eng*, 9, 3744-3748.
- McLeod, F., & Cherrett, T. (2011). Loading bay booking and control for urban freight. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 14(6), 385-397.
- Mommens, K., Lebeau, P., Verlinde, S., Van Lier, T., & Macharis, C. (2018). Evaluating the impact of off-hour deliveries: An application of the TRansport Agent-BAased

- model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 102-111.
- Monreal, I. (2013). Estudio de la polución medioambiental causada por el transporte transpirenaico en el País Vasco y Cataluña: una aproximación estadística. Proyecto TransP2. *Universidad de Navarra. Escuela técnica superior de ingenieros agrónomos*.
- Morganti, E., Seidel, S., Blanquart, C., Dabanc, L., & Lenz, B. (2014). The impact of e-commerce on final deliveries: alternative parcel delivery services in France and Germany. *Transportation Research Procedia*, 4(0), 178-190.
- Motraghi, A., & Marinov, M. V. (2012). Analysis of urban freight by rail using event based simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 25, 73-89.
- Moura, J. L., Alonso, B., Ibeas, Á., & Ruisánchez, F. J. (2012). A two-stage urban bus stop location model. *Networks and Spatial Economics*, 12(3), 403-420.
- Muñoz, J. C., Cortés, C. E., Giesen, R., Sáez, D., Delgado, F., Valencia, F., & Cipriano, A. (2013). Comparison of dynamic control strategies for transit operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 28, 101-113.
- Muñuzuri, J., Cuberos, M., Abaurrea, F., & Escudero, A. (2017). Improving the design of urban loading zone systems. *Journal of transport geography*, 59, 1-13.
- Muñuzuri, J., Grosso, R., Cortés, P., & Guadix, J. (2013). Estimating the extra costs imposed on delivery vehicles using access time windows in a city. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 262-275.
- Nourinejad, M., & Roorda, M. J. (2017). Parking enforcement policies for commercial vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 102, 33-50.
- Nuzzolo, A., & Comi, A. (2011). A system of models for the assessment of city logistics policies. Proceedings of the 4th National Urban Freight Conference (NUF),
- Nuzzolo, A., Comi, A., Ibeas, A., & Moura, J. L. (2016). Urban freight transport and city logistics policies: Indications from Rome, Barcelona, and Santander. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(6), 552-566.

- Nuzzolo, A., Crisalli, U., & Comi, A. (2012). A system of models for the simulation of urban freight restocking tours. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 664-676.
- Ogden, K. W. (1992). *Urban goods movement: a guide to policy and planning*. Ashgate.
- Olsson, J., & Woxenius, J. (2012). Location of Freight Consolidation Centres Serving the City and Its Surroundings. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 293-306.
- Orden PCI/810/2018. de 27 de julio, por la que se modifican los anexos II, XI y XVIII del Reglamento General de Vehículos, aprobado por Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre.
- Ortúzar, J. d. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport*. John wiley & sons.
- Oyatoye, E., Adebisi, S. O., Okoyee, J., & Amole, B. (2011). Application of Queueing theory to port congestion problem in Nigeria.
- Paddeu, D. (2018). Sustainable solutions for urban freight transport and logistics: an analysis of urban consolidation centers. In *Sustainable Freight Transport* (pp. 121-137). Springer.
- Patier, D., David, B., Chalon, R., & Deslandres, V. (2014). A new concept for urban logistics delivery area booking. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 125, 99-110.
- Portilla, A. I., Oreña, B. A., Berodia, J. L., & Díaz, F. J. (2009). Using $M/M/\infty$ Queueing Model in On-Street Parking Maneuvers. *Journal of Transportation Engineering*, 135(8), 527-535.
- Punel, A., & Stathopoulos, A. (2017). Modeling the acceptability of crowdsourced goods deliveries: Role of context and experience effects. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 105, 18-38.
- Quak, H. J., & De Koster, M. (2006). Urban distribution: The impacts of different governmental time-window schemes.
- Rapaport, E. (2002). The Stockholm environmental zone, a method to curb air pollution from bus and truck traffic. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 7(3), 213-224.

- Reiner, G., & Trcka, M. (2004). Customized supply chain design: Problems and alternatives for a production company in the food industry. A simulation based analysis [Conference Paper]. *International Journal of Production Economics*, 89(2), 217-229.
- Robusté, F., Monzón, A., Ibeas, Á., Irisarri, A., García, F., & Aguilar, J. (2011). Red española de plataformas logísticas intermodales para la mejora de la competitividad y la sostenibilidad ambiental del transporte de mercancías (RÉPLICA). *Informe final*.
- Roca-Riu, M., Cao, J., Dakic, I., & Menendez, M. (2017). Designing dynamic delivery parking spots in urban areas to reduce traffic disruptions. *Journal of Advanced Transportation*, 2017.
- Romero, J. P., Benavente, J., Moura, J. L., Ibeas, A., & Alonso, B. (2014). An environmental approach to optimize urban freight transport systems. In *Computer-based Modelling and Optimization in Transportation* (pp. 127-136). Springer.
- Rougès, J.-F., & Montreuil, B. (2014). Crowdsourcing delivery: New interconnected business models to reinvent delivery. 1 st International Physical Internet Conference,
- Russo, F., & Comi, A. (2010). A modelling system to simulate goods movements at an urban scale. *Transportation*, 37(6), 987-1009.
- Russo, F., & Comi, A. (2012). City Characteristics and Urban Goods Movements: A Way to Environmental Transportation System in a Sustainable City. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 61-73.
- Santander, A. d. (2016). Ordenanza de circulación del Excmo. Ayuntamiento de Santander.
- Schmöcker, J.-D., Sun, W., Fonzone, A., & Liu, R. (2016). Bus bunching along a corridor served by two lines. *Transportation Research Part B: Methodological*, 93, 300-317.

- Schoenherr, T. (2009). Logistics and supply chain management applications within a global context: an overview. *Journal of business logistics*, 30(2), 1-25.
- Shishvan, M., & Benndorf, J. (2014). Performance optimization of complex continuous mining system using stochastic simulation. *Proceedings of Engineering Optimization*, 273-278.
- Silas, M., & Holguín-Veras, J. (2009). Behavioral microsimulation formulation for analysis and design of off-hour delivery policies in urban areas. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2097), 43-50.
- Simoni, M. D., & Claudel, C. G. (2018). A simulation framework for modeling urban freight operations impacts on traffic networks. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 86, 36-54.
- Sirmatel, I. I., & Geroliminis, N. (2018). Mixed logical dynamical modeling and hybrid model predictive control of public transport operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 114, 325-345.
- Stathopoulos, A., Valeri, E., & Marcucci, E. (2012). Stakeholder reactions to urban freight policy innovation. *Journal of Transport Geography*, 22, 34-45.
- Sundarapandian, V. (2009). *Probability, statistics and queuing theory*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Taniguchi, E., Thompson, R., T, Y., & Van Duin, R. (2001). *City Logistics. Network modelling and intelligent transport systems*.
- Unión Europea. Directiva 70/156/CEE del Consejo, de 6 de febrero de 1970 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros sobre la homologación de vehículos a motor y de sus remolques.
- Visser, E.-J., & Lanzendorf, M. (2004). Mobility and accessibility effects of b2c e-commerce: a literature review. *Tijdschrift voor economische en sociale geografie*, 95, 189-205.
- Visser, J., Nemoto, T., & Browne, M. (2014). Home delivery and the impacts on urban freight transport: A review. *Procedia-social and behavioral sciences*, 125, 15-27.

- Wang, J. S., Chan, T. L., Ning, Z., Leung, C. W., Cheung, C. S., & Hung, W. T. (2006). Roadside measurement and prediction of CO and PM_{2.5} dispersion from on-road vehicles in Hong Kong [Article]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11(4), 242-249.
- Weltevreden, J. W. (2008). B2c e-commerce logistics: the rise of collection-and-delivery points in The Netherlands. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 36(8), 638-660.
- Wenneman, A., Habib, K. M. N., & Roorda, M. J. (2015). Disaggregate analysis of relationships between commercial vehicle parking citations, parking supply, and parking demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2478), 28-34.
- Wu, L., Yue, X., Jin, A., & Yen, D. C. (2016). Smart supply chain management: a review and implications for future research. *The International Journal of Logistics Management*, 27(2), 395-417.
- Wygonik, E., & Goodchild, A. V. (2018). Urban form and last-mile goods movement: Factors affecting vehicle miles travelled and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 217-229.
- Yang, K., Roca-Riu, M., & Menéndez, M. (2018). An Auction-based Approach for Prebooked Urban Logistics Facilities. *Omega*.
- Zhao, B., Zhang, J., & Wei, W. (2019). Impact of Time Restriction and Logistics Sprawl on Urban Freight and Environment: The Case of Beijing Agricultural Freight. *Sustainability*, 11(13), 3675.

